

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 Skikda.



Faculté des Sciences
Département d'Informatique
Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme De :

MASTER

Option : *réseaux et systèmes distribués (RSD).*

THÈME :

*Mise en œuvre d'un protocole de routage dans
les réseaux de capteurs sans fil.*

Réalisé par :

- *Bouchemma abderrahmene*
- *Boulares farida*

Encadré par :

Pr. Redjimi Mohammed.

Session : Juin 2025



Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre promoteur

Redjimi Mohammed pour sa disponibilité, ses idées, ses conseils et son

encouragement depuis le début de ce travail jusqu'à la fin

Nous tenons également à remercier chaleureusement nos très

chers parents pour leur présence, leur encouragement, leur

compréhension et leur soutien indéfectible qu'ils ont su nous

apporter à tout moment

Nos remerciements les plus sincères vont à nos amies qui étaient

toujours là durant les moments critiques à nous écouter

Enfin, nos remerciements s'adressent aux membres du jury qui

vont nous faire l'honneur de juger notre travail

Dédicaces

Avant tout

Je remercie « **Mon Dieu** »

Qui m'a aidé et m'a facilité tout pour réaliser ce succès

Je dédié ce travail

À la plus chérie personne dans ma vie

L'empereur mon père « **Mohamed** »

Qui m'a encouragé

Et m'a fourni tous les moyens et tout le soutien moral

Est à m'a cher mère « **Ahour Z** »

Et aussi à mon frère le boss

« **Abde ALLAH** »

Abderrahmane

Bouchemma



Dédicace

*Je dédie cet ouvrage à **mon père** décédé, que dieu lui fasse
miséricorde et lui accorde une place spacieuse au paradis,*

*À **ma chère mère**, que dieu la protège et prenne soin d'elle*

À mes chers frères et sœurs,

À mes collègues de travail.

Boulares Farida





ملخص

أدت التطورات الحديثة في مجال الاتصالات اللاسلكية والإلكترونيات إلى تطوير أجهزة استشعار صغيرة الحجم ومنخفضة التكلفة ومتعددة الوظائف، مما أدى إلى ظهور شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs). تُستخدم هذه الشبكات لمراقبة مختلف الظواهر في المواقع التي يصعب فيها التدخل البشري. تنتشر أجهزة الاستشعار على نطاق واسع ولا تتطلب صيانة، نظرًا لقلّة مصدر الطاقة لكل عقدة استشعار. يُمثل هذا تحديًا للباحثين الذين يسعون إلى تحسين استهلاك الطاقة وإطالة عمر الشبكة لأطول فترة ممكنة. في هذا العمل، سنقدم بروتوكول LEACH، وهو أحد أهم البروتوكولات المساهمة في ترشيد الطاقة.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSN)، بروتوكولات التوجيه، البروتوكولات الهرمية، LEACH.

Abstract

Recent developments in wireless communications and electronics have led to the development of small-sized, low-cost, and multi-functional sensors, resulting in the emergence of Wireless Sensor Networks (WSNs). These networks are used to monitor various phenomena in locations where human intervention is difficult. Sensor devices are widely distributed and require no maintenance, as each sensor node has a limited power source. This presents a challenge for researchers, who aim to optimize energy consumption and extend the network's lifespan for as long as possible. In this work, we will present the LEACH protocol, which is one of the most important protocols contributing to energy conservation.

Keywords: Wireless Sensor Networks (WSN), Routing protocols, Hierarchical protocols, LEACH.

Résumé

Les progrès récents de la télécommunication sans fil et de l'électronique ont conduit au développement de capteurs de petite taille ; faible coût et multitâches, d'où l'émergence des réseaux de capteurs sans fil RCSF, ces derniers sont utilisés pour surveiller divers phénomènes dans les lieux difficiles pour l'intervention humaine. Les capteurs sont caractérisés par leur large diffusion sans la nécessité d'aucune maintenance, car chaque nœud de capteur a une source d'énergie limitée, et c'est ce qui pose un défi pour les chercheurs en essayant d'améliorer la consommation d'énergie et de prolonger la durée de vie des réseaux le plus longtemps possible. Dans notre travail, nous vous présenterons le protocole LEACH, qui est l'un des protocoles les plus importants dans la contribution à la conservation de l'énergie.

Mot-clés : Réseaux de capteurs sans fil (WSN), Protocoles de routage, Protocole hiérarchique, LEACH.



List de figure

Figure 1.1. Architecture d'un réseau sans-fil Ad hoc	6
Figure 1.2. Architecture d'un nœud capteur.....	7
Figure 2.1 : Classification des protocoles de routage selon la structure de réseau	14
Figure 2.2 : Topologie plate (Flat).....	14
Figure 2.3 : Routage hiérarchique	15
Figure 2.4 : Topologie basée sur localisation	18
Figure 3.1 Architecture de routage hiérarchique.....	28
Figure 3.2. Formations de clusters et transmission de données.	30
Figure 4.1. Le modèle radio.	39
Figure 4.2 Déploiement des nœuds	42
Figure 4.3. Formation des clusters (zone de 300*300).....	43
Figure 4.4. Nœuds morts (1000 rounds).....	43
Figure 4.5. Nœuds vivants (1000 rounds)	44
Figure 4.6. Paquets transmis à la Base Station (BS) (1000 rounds)	44
Figure 4.7. Paquets transmis à la Base Station (BS) par round (1000 rounds).....	45
Figure 4.8. Paquets transmis aux CH (1000 rounds).....	45
Figure 4.9. Débit du réseau (1000 rounds)	46
Figure 4.10. Energie résiduelle	46

Table des matières

Introduction générale.....	2
Chapitre 01	4
I.1 Introduction	5
I.2 Les Réseaux Ad hoc.....	5
I.3 Les capteurs sans-fil.....	6
I.4 Réseaux de capteurs sans fil.....	7
1.4.1. Définition d'un réseau de capteurs	7
I.5 Caractéristiques des RCSF.....	8
I.5.1 Densité importante des noeuds.....	8
I.5.2 Topologie dynamique	8
I.5.3 Auto organisation.....	8
I.5.4 Tolérance aux pannes.....	9
I.5.5 Scalabilité.....	9
I.6 Domaines d'applications des RCSF.....	9
I.6.1 Applications militaires	9
I.6.2 Applications à la surveillance.....	10
I.6.3 Applications environnementales.....	10
I.6.4 Applications médicales	10
I.6.5 Domotique.....	11
I.6.6 Applications commerciales	11
I.7 Conclusion	11
Chapitre 2	12
1. Introduction	13
2. Les protocoles de routage.....	13
2.1 Le routage dans les RCSFs.....	13
2.2 Les approches de routage hiérarchiques pour les RCSFs	13
2.2.1 Classification selon la structure du réseau	14
2.2.1.1 Protocoles de routage à plat.....	14
2.2.1.2 Protocoles de routage hiérarchique.....	15
2.2.1.3 Les protocoles géographiques.....	17

2.2.2 Classification selon les fonctions des protocoles	18
2.2.2.1 Routage basé sur la qualité de service.....	18
2.2.2.2 Routage avec contrôle de flux de données	19
2.2.2.3 Routage basé sur la négociation	19
2.2.2.4 Routage multi-chemin.....	20
2.2.3 Classification selon l'établissement des routes	20
2.2.3.1 Les protocoles de routages proactifs	20
2.2.3.2 Les protocoles de routages réactifs.....	20
2.2.3.3 Les protocoles de routages hybrides.....	21
2.3. Facteurs influant sur la conception d'un protocole de routage.....	21
2.3.1. Mobilité du réseau.....	21
2.3.2. Déploiement des nœuds	22
2.3.3. Consommation d'énergie	22
2.3.4. Modèle de livraison de données	22
2.3.5. Hétérogénéité Nœud/Lien	23
2.3.6. Tolérance aux fautes.....	23
2.3.7. Scalabilité.....	23
2.3.8. Connectivité	23
2.4. Métriques de routage.....	23
2.4.1. Métriques pour la consommation énergétique	24
2.4.1.1. Considération de puissance	24
2.4.1.2. Considération du coût	24
2.4.1.3. Considération de puissance et du coût	24
2.4.2. Route à nombre de sauts minimum.....	24
2.4.3. Perte de paquets	24
3. Selon le modèle de livraison de données	25
3.1. Event driven.....	25
3.2. Query driven.....	25
3.3. Le modèle continu.....	25
4. Conclusion	26



Chapitre 03	27
Introduction.....	28
3.1. Principe du Protocole LEACH.....	28
3.2. Fonctionnement de LEACH.....	28
3.3. Sélection des Chefs de Cluster.....	30
3.4. Avantages de LEACH.....	32
4. Limitations de LEACH.....	33
5. Améliorations et modifications possibles du protocole LEACH.....	34
5.1. LEACH-C (Centralisé).....	34
5.2. S-LEACH (Solar-aware LEACH).....	34
5.3. Multi-hop LEACH.....	35
5.4. LEACH-E (LEACH à Énergie résiduelle).....	35
5.5. Q-LEACH (Quality of Service aware LEACH).....	35
5.6. LEACH avec mobilité (M-LEACH).....	35
5.7. LEACH avec Compte de Chef (LEACH-B).....	35
5.8 Exemple de combinaison.....	35
6. Conclusion.....	36
Chapitre 04	37
Introduction.....	38
4.1. Hypothèses et Paramètres de Simulation.....	38
4.2. La modélisation énergétique.....	38
4.3. Implémentation du Protocole LEACH.....	39
4.3.1. Initialisation des Nœuds.....	40
4.4. Résultats et Visualisation.....	42
5. Conclusion.....	47
Conclusion Générale.....	48
Reference.....	50

The image features a central white rectangular area framed by a thin, light brown border. This central area is set against a background of a light-colored, textured surface, possibly marble or stone, with some brownish spots. In the corners of the image, there are watercolor-style illustrations of blue leaves. The leaves are rendered in various shades of blue, from light to dark, and are arranged in a way that they appear to be growing from the corners of the white frame. The overall composition is clean and artistic.

Introduction
Générale



Introduction générale

Aujourd'hui les réseaux de capteurs deviennent de plus en plus répandus. Ils sont utilisés dans divers domaines. Leurs applications sont de plus en plus nombreuses et diversifiées, citons par exemple : le domaine scientifique, militaire, environnementale ou encore la santé. Ces réseaux sont différents des autres réseaux sans fil car ils ont en général les spécificités suivantes : une grande densité, un faible débit, une faible capacité d'énergie et un environnement souvent inaccessible. Ces deux dernières spécificités ont fait de l'énergie une contrainte très importante puisque les batteries des capteurs ne sont pas généralement rechargeables. La consommation d'énergie au niveau des capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau en entier. Il est donc impératif de mettre en place des protocoles de routage efficaces en énergie et qui prennent en compte les contraintes imposées par ces capteurs.

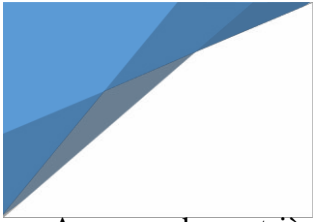
Dans les réseaux sans fil, on donne plus d'importance à l'acheminement de l'information qui est assuré par des algorithmes de routage. Ces algorithmes de routage doivent prendre en considération les changements de la topologie du réseau ainsi que d'autres caractéristiques comme la bande passante, le nombre de liens, la limitation d'énergie, etc. En particulier pour les réseaux de capteurs qui se caractérisent par des liens volatiles et des dispositifs fragiles, les protocoles de routage perdent leurs performances quand un lien est perdu ou un dispositif cesse de fonctionner. Dans ce contexte, plusieurs recherches ont été menées notamment pour garantir le routage de l'information de n'importe quel nœud vers la station de base.

L'objectif de ce mémoire est de développer un protocole existant LEACH qui est l'un des algorithmes de routage hiérarchique les plus populaires pour les réseaux de capteurs sans fil, il est basé sur l'approche de clustering; Son principal avantage est de minimiser la consommation énergétique des éléments du réseau. Dans ce protocole, le réseau est divisé en clusters et chaque cluster possède un nœud maître appelé Cluster Head.

Le souci principal est d'assurer la livraison des données à la station de base tout en prolongeant la vie du système. Pour cela, nous avons tout d'abord étudié les performances de LEACH puis nous avons procédé à sa mise en œuvre et sa simulation en utilisant l'environnement Matlab.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, leurs caractéristiques et leurs domaines d'applications.
- Le deuxième chapitre est consacré au routage dans les réseaux de capteurs sans fil, ainsi que les différentes classifications.
- Le troisième chapitre est consacré à la description détaillée du protocole de routage LEACH.



Au cours du quatrième chapitre, nous détaillons notre plateforme de simulation et les étapes d'implémentation du protocole LEACH.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale dans laquelle, les principales retombées de ce travail sont présentées et qui dresse quelques perspectives futures.

The background features a light, textured surface with watercolor-style blue leaves scattered around the edges. The leaves are in various shades of blue and teal, with some showing darker veins. A thin, light-colored rectangular border frames the central text area.

Chapitre I :
Les réseaux
De capteurs sans-fil



I.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont l'un des résultats les plus récents des progrès en relations aux réseaux sans-fil, aux "MEMS" (systèmes micro-électromécaniques), à l'embarqué et des systèmes sophistiqués. Ils permettent, à coût raisonnable, d'élaborer des dispositifs miniaturisés incluant des capteurs qui peuvent transmettre et recevoir des signaux sur de courtes distances sans aucune liaison filaire. Le regroupement en réseau de ces dispositifs, dits micro-capteurs, permet de réagir à des événements sur des étendues géographiques et d'analyser les données captées sur ces zones.

Les types étudiés ci-après sont ces réseaux sans fils, avec des systèmes spécifiques utilisant des socles similaires. Plusieurs caractéristiques distinguent ces réseaux des réseaux ad hoc traditionnels tels que les usages potentiels attendus de ces réseaux. Nous allons couvrir, dans ce qui suit, quelques détails concernant les architectures et les protocoles utilisés dans ce type de réseaux en abordant le cadre de circulation dans les réseaux de capteurs ainsi que la totalité des éléments qui influencent les choix de conception de leur structure. Il existe un ensemble de circuits de routage que ce type de réseau utilise, que nous allons proposer en fin de présentation [01].

I.2 Les Réseaux Ad hoc

Un réseau Ad hoc (Ad hoc network), généralement désigné sous le nom de MANET (Mobile Ad hoc Network), fait référence à un ensemble d'unités mobiles possédant une interface de communication sans fil, formant un réseau qui n'utilise pas d'infrastructures fixes. Les nœuds des MANETs sont équipés d'émetteurs et de récepteurs sans-fil utilisant des antennes qui peuvent être omnidirectionnelles (broadcast), fortement directionnelles (point à point), ou une combinaison de ces deux types. Ils maintiennent d'une manière coopérative la connectivité du réseau, en fonction de leurs positions, la configuration de leurs émetteurs/récepteurs, la puissance de transmission et les interférences entre les canaux de communication. La modélisation de cette connectivité est détaillée dans la section suivante. Un réseau ad hoc peut être isolé, mais il peut aussi avoir des passerelles ou des interfaces qui le relie à un réseau fixe.

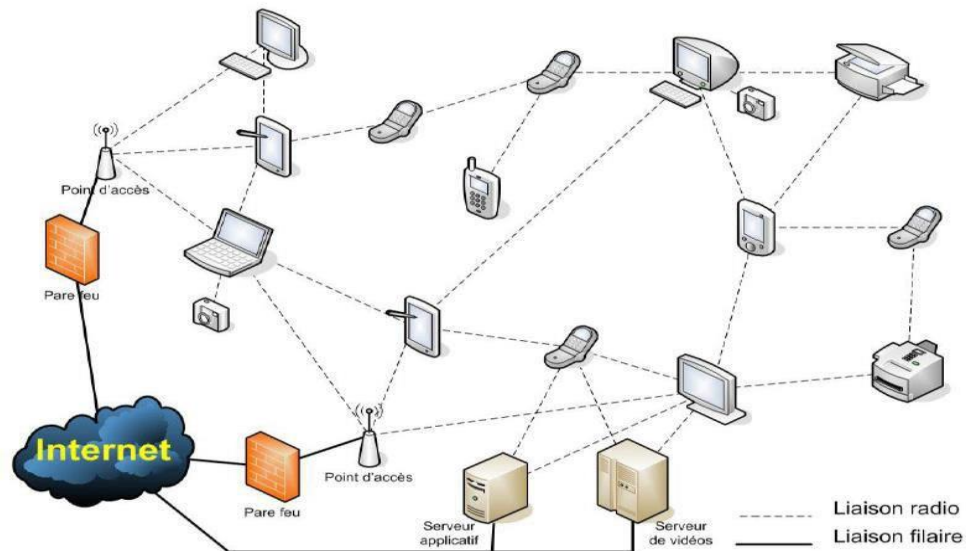


Figure 1.1. Architecture d'un réseau sans-fil Ad hoc.

I.3 Les capteurs sans-fil

Les capteurs sans-fil, considérés ici, sont conçus comme de véritables systèmes embarqués, dotés de moyens de traitement et de communication de l'information, en plus de leur fonction initiale de relever des mesures. Ils représentent une révolution technologique des instruments de mesure, issue de la convergence des systèmes électroniques miniaturisés et des systèmes de communication sans-fil.

L'architecture d'un nœud est complètement dépendante de l'objectif de son déploiement. Néanmoins, quatre unités de base sont présentes dans chaque capteur à savoir [02] :

- **L'unité de captage** : Transforme les signaux analogiques fournis par le capteur en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement ;
- **L'unité de traitement** : Gère les procédures permettant au nœud de collaborer avec le reste du réseau et peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche au collecteur ;
- **L'unité de transmission** : Effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un medium sans-fil. Elle peut être de type radiofréquence (RF) ou de type optique ;
- **L'unité de contrôle d'énergie** : Est responsable de répartir l'énergie disponible aux autres modules et de réduire les dépenses en mettant en veille les composants inactifs par exemple.

En plus de ses quatre composants principaux, un capteur peut contenir, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un **générateur d'énergie** pour les cellules solaires, un **système de localisation** GPS (Global Positioning System) ou un **système mobilisateur** chargé de déplacer les nœuds capteurs en cas de nécessité. La figure I.2 présente l'architecture générale d'un nœud capteur.

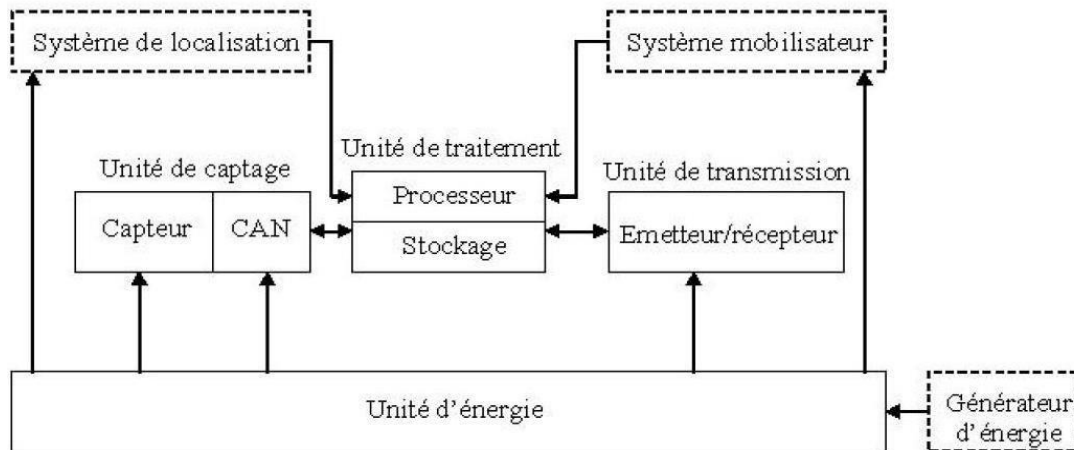


Figure 1.2. Architecture d'un nœud capteur.

1.4 Réseaux de capteurs sans fil

Les progrès réalisés ces dernières années dans le domaine de la microélectronique ont donné naissance à un autre type de réseaux ad hoc sans fil qui sont les réseaux de capteurs. Ce type de réseaux profite du développement de la miniaturisation des circuits électronique pour prendre sa place dans tous les domaines.

1.4.1. Définition d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteurs sans fil (Wireless sensor Network : WSN) est un réseau ad hoc multi-saut à grande échelle (composé de centaines voire des milliers de capteurs) dédiés pour la surveillance de zones d'intérêt appelée zone de captage. Ces réseaux sont déployés de manière aléatoire les capteurs sont catapultés depuis un hélicoptère). Le déploiement se fait généralement dans des endroits hostiles où nt l'intervention humaine n'est pas facile. Voire impossible. Les capteurs communiquent entre eux les données captées via un module sans fil utilisant des signaux radiofréquences pour le partage d'informations et le traitement coopératif. Contrairement aux réseaux ad hoc qui se base sur les communications point à point, les réseaux de capteurs utilisent le mode de communication broadcast (diffusion). Deux types de nœuds capteurs peuvent être distingués : capteurs (nœuds ordinaires) et nœud puits. Un nœud capteur détecte les phénomènes physiques et surveille son environnement immédiat pour transmettre les données nécessaires au nœud puits appelé aussi Station de Base. Ce dernier collecte les données, les stocke et les analyse pour les utiliser dans une application spécifiée au préalable ou les communiquer à d'autre réseaux auxquels il est relié par Internet ou Satellite [03].



I.5 Caractéristiques des RCSF

Les réseaux de capteurs sans-fil sont considérés comme un type spécial des réseaux Ad hoc et sont significativement différents des réseaux MANET traditionnels. En effet, Dans un réseau MANET, l'organisation des tâches, le routage ainsi que la gestion de mobilité sont principalement réalisés pour optimiser la qualité de service (QoS) et offrir une meilleure bande passante. Ces réseaux sont conçus pour fournir de bons débits de transfert sous les conditions de forte mobilité. Par ailleurs, comme leurs batteries peuvent être remplacées dès que nécessaire, la consommation d'énergie est donc d'une faible importance [04]. Les principaux caractéristiques des réseaux de capteurs se résument dans ce qui suit :

I.5.1 Densité des nœuds

Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important de nœuds pour garantir une couverture totale de la zone surveillée. Ceci engendre un niveau de surveillance élevé et assure une transmission plus fiable des données sur l'état du champ de capteur.

I.5.2 Topologie dynamique

La topologie des réseaux de capteurs est instable ou dynamique est cela est due aux trois facteurs essentiels suivants :

- **La mobilité des nœuds** : Les nœuds capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement et arbitrairement, introduisant ainsi une topologie instable du réseau.
- **La défaillance des nœuds** : Du fait de l'autonomie énergétique limitée des nœuds, la topologie du réseau n'est pas fixée (les nœuds « morts » sont, d'un point de vue logique, simplement supprimés).
- **L'ajout de nouveaux nœuds** : De nouveaux nœuds peuvent facilement être rajoutés. Il suffit de placer un nouveau capteur qui soit dans la portée de communication d'au moins un autre nœud capteur du réseau déjà existant.

I.5.3 Auto organisation

L'auto organisation s'avère très nécessaire pour ce type de réseau afin de garantir sa maintenance. Pour remédier au problème de changement non prédictible de topologie, une auto-organisation du réseau s'avère nécessaire. C'est-à-dire que les nœuds doivent savoir localiser leurs voisins et établir des routes pour que l'information puisse circuler à travers le réseau.



I.5.4 Tolérance aux pannes

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

I.5.5 Scalabilité

Les réseaux de capteurs peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Un nombre aussi important engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que le nœud *sink* (puits) soit équipé d'une mémoire importante pour stocker les formations reçues.

I.6 Domaines d'applications des RCSF

La miniaturisation, l'adaptabilité, le faible coût et la communication sans-fil permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ils permettent aussi d'étendre le domaine des applications existantes.

Les réseaux de capteurs peuvent être composés, suivant leur utilisation, de différents types de nœuds capteurs, tels que les capteurs sismiques, thermiques, visuels, infrarouges, acoustiques et radar, ils sont capables de surveiller une grande variété de phénomènes ambiants. Parmi les domaines où ces réseaux se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions, on peut citer le militaire, la santé, l'environnemental, et les maisons intelligentes, ...etc. [05].

I.6.1 Applications militaires

Le faible coût, le déploiement rapide, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes sont des caractéristiques qui ont rendu les réseaux de capteurs efficaces pour les applications militaires.

En effet, comme beaucoup d'autres technologies de l'information, ces réseaux sans-fil proviennent principalement de la recherche militaire. Des réseaux de capteurs autonomes sont envisagés comme l'ingrédient essentiel dans cette lancée vers des systèmes de guerre centrés sur les réseaux. Ils peuvent être rapidement déployés et utilisés pour la surveillance des champs de bataille afin de fournir des renseignements concernant l'emplacement, le nombre, le mouvement, et l'identité des soldats et des véhicules, ou bien encore pour la détection des agents chimiques, biologiques et nucléaires.



I.6.2 Applications à la surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

I.6.3 Applications environnementales

Le contrôle des paramètres environnementaux par les réseaux de capteurs peut donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par suite faciliter la lutte contre les feux de forêt avant leur propagation. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air. De même leur déploiement dans les sites industriels empêche les risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole,...etc.). Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

I.6.4 Applications médicales

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, détection de cancers,...etc.).

Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques (la tension artérielle, battements du cœur,...etc.) à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière. Les données physiologiques collectées par les capteurs peuvent être stockées pendant une longue durée pour le suivi d'un patient. D'autre part, ces réseaux peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri,...etc.) chez les personnes dépendantes (handicapées ou âgées).



I.6.5 Domotique

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, etc. Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance. Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière s'éteint et la musique se met en état d'arrêt quand 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.

I.6.6 Applications commerciales

Les réseaux de capteurs possèdent également d'autres applications dans le domaine commercial, parmi lesquelles on peut énumérer : la surveillance de l'état du matériel, la gestion des inventaires, le contrôle de qualité des produits, la construction des espace d'achat intelligents, le contrôle de l'environnement dans les bâtiments administratives, le contrôle des robots dans les environnements de fabrications automatiques, les jouets interactifs, les musées interactifs, le contrôle et l'automatisation des processus d'usinage, le diagnostic des machines, le transport, la détection et la surveillance des vols de voitures, le dépistage des véhicules, l'instrumentation des chambres blanches consacrées aux traitements des semi-conducteurs,...etc.

I.7. Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil constituent une avancée technologique très importante dans les systèmes de collecte et de transmission de l'information. Les connexions sans fil offrent plusieurs avantages comme l'ubiquité : l'information est diffusée partout et en même temps sur toute la zone de couverture, pas de câblage : Les infrastructures filaires utilisent des câblages complexes qui occupent de l'espace inutilement, ont des coûts importants, consomment de l'énergie supplémentaire inutile.

The background features a light, textured surface with watercolor-style illustrations of blue leaves. The leaves are scattered around a central white rectangular area, with some extending into the corners. The colors range from light blue to deep, dark blue, with some purple undertones. The overall style is artistic and decorative.

Chapitre II :
Les protocoles
de routage hiérarchiques pour
les RCSF

1. Introduction

Les capteurs sont conçus pour fonctionner durant des mois voire des années. Ainsi, la capacité énergétique des capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau.

À noter qu'une fois qu'un nœud capteur a épuisé son énergie, il est considéré comme défaillant. Ainsi, il y a une forte probabilité de perdre la connectivité du réseau. Dans ce chapitre, nous décrivons les protocoles de routage dans les RCSFs et quelques exemples.

2. Les protocoles de routage

2.1 Le routage dans les RCSFs

Les contraintes présentées dans les RCSF ont donné naissance à des protocoles de routage différents que ceux des autres réseaux sans fil puisque la contrainte énergétique se pose avec force dans les RCSF. De ce fait, les protocoles de routage conçus pour les RCSF doivent garantir l'acheminement de l'information entre tout nœud du réseau et la station de base à moindre coût en termes d'énergie. Dans ce qui suit, nous présentons quelques approches et techniques sur lesquelles se basent les protocoles de routage dans les réseaux sans fil et en particulier dans les réseaux de capteurs.

Dans les RCSF, les capteurs sont déployés en grand nombre pour mesurer et/ou surveiller un ensemble de phénomènes physiques et envoyer l'information à des centres de contrôle distants. Pour atteindre cet objectif, les capteurs ont la capacité de communiquer et collaborer entre eux pour acheminer l'information collectée à la station de base en garantissant sa fiabilité et en empruntant le plus court chemin entre le nœud qui a détecté ce phénomène et la station de base. Cette opération se fait grâce au processus de routage de l'information entre ces deux éléments et elle consiste à trouver les routes les plus courtes garantissant, ainsi, une consommation optimale d'énergie. Dans cette optique, plusieurs protocoles de routage ont été proposés dans la littérature, néanmoins, ces protocoles peuvent être regroupés selon plusieurs classifications utilisant plusieurs critères ; à savoir, la topologie du réseau, les opérations supportées et la destination des paquets transmis.

La topologie du réseau consiste à subdiviser les solutions de routage en trois (03) catégories principales : protocoles à topologie plate, protocoles hiérarchiques, protocoles géographique (location-based) [06].

2.2 Les approches de routage hiérarchiques pour les RCSFs

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont déployés d'une manière dense où chaque nœud peut avoir plusieurs dizaines de voisins. Pour permettre la communication dans le réseau déployé, des protocoles de routage basés sur la communication multi-sauts entre les nœuds capteurs et le nœud puits du réseau sont parfois nécessaires.

Le principe de fonctionnement de chaque protocole diffère suivant la philosophie de l'approche à laquelle il appartient. Ces approches peuvent être distinguées suivant : la structure du réseau, les fonctions des protocoles ou l'établissement des routes.[07]

2.2.1 Classification selon la structure du réseau

Comme il est illustré dans la figure suivante, les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classifiés en trois catégories : protocoles plats, protocoles hiérarchiques et protocoles basés sur la localisation. [08]

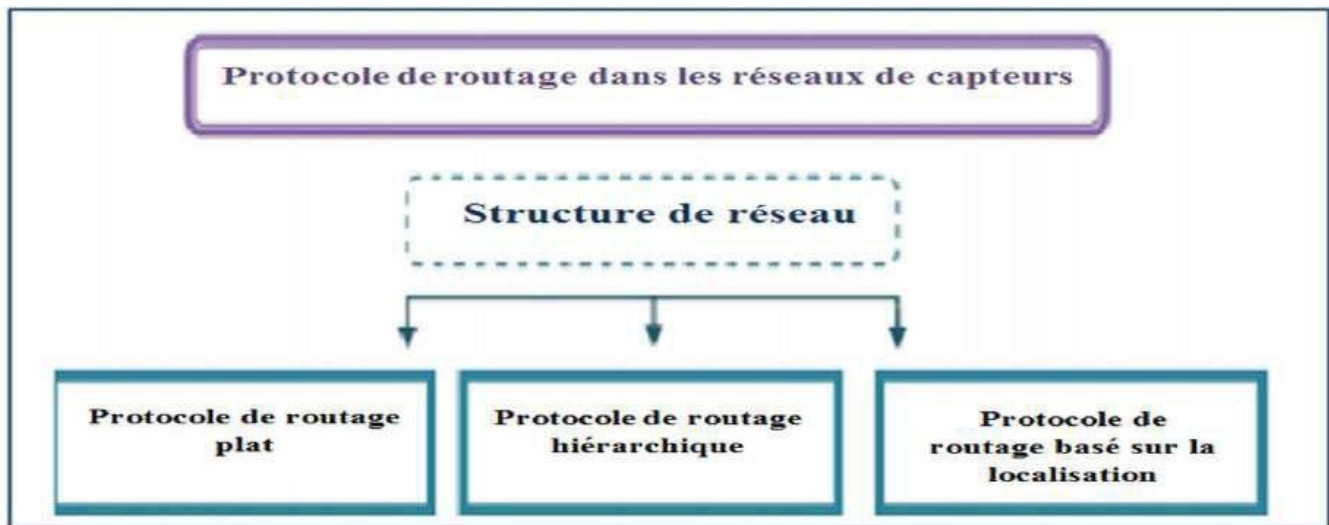


Figure 2.1 : Classification des protocoles de routage selon la structure de réseau

2.2.1.1 Protocoles de routage à plat

Ce type de protocoles est le premier à être utilisé pour le routage sur les RCSFs; son principe est simple, c'est le puits qui envoie des requêtes vers des zones spécifiques du réseau et attend l'arrivée des réponses des nœuds visés. Deux exemples phares de cette classe de protocoles sont SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) et DD (Direct Diffusion) [09].

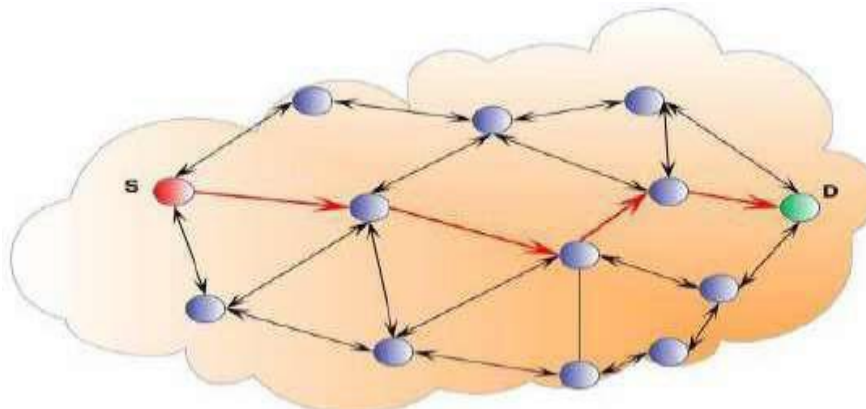


Figure 2.2: Topologie plate (Flat)

Avantages du routage à plat

- Scalabilité : les réseaux à plat sont scalables du fait que tous les nœuds du réseau ont les mêmes rôles et participent similairement au routage des données capturées. Ainsi, les nœuds ont besoin seulement des informations sur leurs voisins directs.
- Les réseaux à plat permettent aux protocoles de routage d'être simples, puisque les nœuds communiquent entre eux sans avoir appel à un intermédiaire.
- L'agrégation des données s'effectue par les nœuds capteurs en éliminant les redondances sur les messages qui proviennent des nœuds voisins.

Inconvénients du routage à plat

- Les nœuds qui entourent un nœud puit consomment beaucoup plus d'énergie que les autres nœuds, car le trafic le plus élevé dans un réseau se trouve autour des nœuds puits.

2.2.1.2 Protocoles de routage hiérarchique

Les protocoles à topologie 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 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 destination.

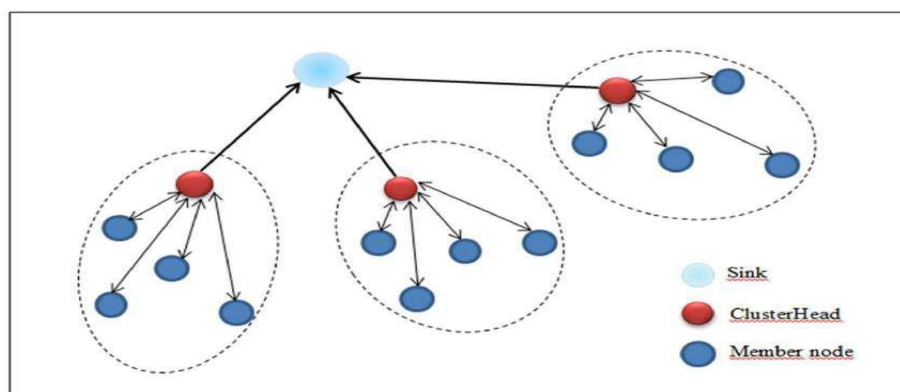


Figure 2.3 : Routage hiérarchique.



Avantages du routage hiérarchique

- Agrégation : les données qui sont collectées à partir d'un ensemble de nœuds d'un cluster peuvent être fusionnées par un cluster-head et par la suite envoyées vers la destination.
- Délais réduits, car plusieurs chemins formés par les cluster-heads sont toujours disponibles.

Inconvénients du routage hiérarchique

- Non scalable: les protocoles hiérarchiques souffrent du problème de passage à l'échelle, puisque le nombre de cluster-heads augmente au fur et à mesure que la taille du réseau augmente.
- Exigences matérielles : les cluster-heads consomment plus d'énergie que les autres nœuds dans le réseau, ce qui nécessite des nœuds avec une grande capacité en énergie/ portée de transmission.
- Condition physique : plusieurs protocoles n'exigent que les nœuds cluster-head aient des ressources énergétiques plus élevées que les autres nœuds dans le réseau.

a- Caractéristique d'un protocole de routage hiérarchique

Un protocole de routage hiérarchique doit spécifier plusieurs tâches mais tout d'abord quelques définitions s'imposent.

- **Clustering** : le clustering est une technique pour partitionner le réseau en groupes (Clusters), sachant que pour chaque groupe est désigné un leader (Cluster Head), ce dernier communique avec les membres de son groupe et peut être avec les Cluster Heads des autres groupes. De cette manière, l'opération de clustering contribue considérablement à l'économie d'énergie, à la réduction de la complexité des protocoles de routage, et à la résistance au facteur d'échelle, en plus de l'agrégation de données qui permet d'éliminer la redondance de données et de n'envoyer que les informations utiles [10].
- **Cluster Head** : nécessaire pour organiser l'activité des clusters, il représente le chef du groupe surnommé aussi le leader, ses tâches sont diverses tel que l'organisation de la communication inter-cluster et intra-cluster, l'agrégation de données, il est élu par les autres nœuds ou bien pré-assignés par le concepteur de réseau, il peut être ordinaire comme les autres nœuds ou bien être doté de plus d'énergie .
- **Station de base** : elle se situe au niveau supérieur de la hiérarchie d'un réseau de capteur, elle fournit une connexion entre le réseau et l'utilisateur finale.
- **Election des Cluster Head** : le nœud Cluster Head consomme plus d'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 d'énergie créant un déséquilibre de la distribution d'énergie sur le réseau. Pour pallier à ce problème, une rotation de ce rôle de Cluster Head est organisée au sein du cluster ou bien au sein du réseau entier.

- **Communication intra-cluster** : la communication entre nœuds Cluster Head et les autres nœuds membres du cluster peut se faire, soit en un seul saut soit, en plusieurs sauts.
- **Communication inter-cluster** : les Cluster Heads communiquent avec la station de base directement, soit en deux ou plusieurs sauts via des nœuds appelés généralement des "Nœud Gateway ". Ces nœuds peuvent être des CH ou bien des nœuds membres d'un cluster. L'utilisation de la consommation en multi-sauts permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la scalabilité du réseau.

b- L'objectif du routage hiérarchique pour les RCSF

L'objectif principal du routage hiérarchique est de maintenir efficacement la consommation d'énergie des nœuds de capteurs en les impliquant dans la communication multi-hop au sein d'un cluster et en effectuant l'agrégation et la fusion des données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la destination. La formation de clusters est généralement fondée sur la réserve d'énergie des capteurs et sur les capteurs qui sont à proximité de cluster-Head [11].

2.2.1.3 Les protocoles géographiques

Les protocoles géographiques, aussi appelés les protocoles de routage basés sur la localisation utilisent les informations d'emplacement pour guider la découverte de routage et la transmission des données. Ils permettent la transmission directionnelle de l'information en évitant l'inondation d'information dans l'ensemble du réseau. Dans ce type de protocoles, chaque nœud du réseau connaît sa position et celle de ses voisins. Le positionnement du nœud peut être obtenu en utilisant un système de géo- positionnement tel que le GPS ou bien via des algorithmes de positionnement relatif. Il peut donc calculer sa distance et celle de ses voisins à la destination et envoie l'information à son voisin qui le rapproche le plus de la destination finale. Une estimation de la consommation d'énergie est réalisée au préalable pour désigner le chemin le plus rentable énergétiquement en obligeant les nœuds, qui ne sont pas sur le chemin du routage choisi, à entrer en mode veille. Avec la topologie réseau basée sur des informations de localisation de nœuds, la gestion du réseau devient simple, mais le fait que chaque nœud doit connaître les emplacements des autres nœuds reste l'inconvénient majeur de ces protocoles. Deux solutions phares de ce type de routage et qui sont : le protocole GAF et le protocole GEAR [12].

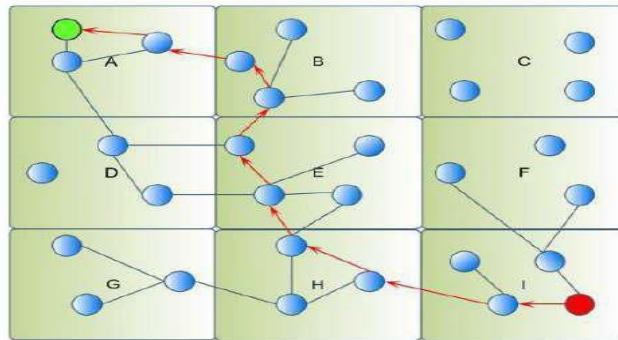


Figure 2.4: Topologie basée sur localisation

Avantages du routage basé sur la localisation

- L'application des systèmes de positionnement, tels que le GPS facilite le contrôle de la topologie et celui de la puissance de transmission des capteurs.
- Dans le routage basé sur la localisation géographique, la région de captage est connue et les requêtes peuvent être donc dirigées uniquement vers cette région, ce qui éliminera le nombre de transmission de manière significative.
- Avec les informations de positionnement, le réseau minimise l'énergie grâce à la facilité du calcul des routes énergétiquement optimales.

Inconvénients du routage basé sur la localisation

- Les nœuds doivent être équipés d'un système de localisation par satellite.
- Le routage basé sur la localisation géographique n'est pas un bon choix pour les applications qui exigent une livraison fiable à des intervalles réguliers des paquets de données.
- Le positionnement dépend de la ligne de vision, et la topographie de la surface.

2.2.2 Classification selon les fonctions des protocoles

2.2.2.1 Routage basé sur la qualité de service

Dans cette catégorie, le protocole essaye de trouver un compromis entre la consommation de l'énergie et un ou plusieurs qualités de services lors de la livraison de données, ces qualités de services peuvent être le délai, la bande passante, ...etc. Un exemple de ce type de routage est le protocole SPEED.

L'avantage majeur de ce type de protocoles reste la prise en compte des délais de transmissions qui les rend très recommandés à des applications de surveillance (centres nucléaires, applications militaires, etc.). Or, l'approche doit prendre en considération la contrainte d'énergie en parallèle avec les critères de la QoS.

2.2.2.2 Routage avec contrôle de flux de données

Dans ce type de routage, la phase d'établissement de routes est modélisée et résolue comme un problème de demande de flux de données où le flot représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux avec lequel les paquets sont produits par les différents nœuds.

Avantages du routage à contrôle de flux

- L'adaptation du trafic aux capacités énergétiques des liens et des capteurs.
- La durée de vie du réseau est présentée comme une fonction générale de tous les nœuds, dont l'objectif est de maximiser les durées de vie élémentaires des capteurs.
- Répartition du trafic de façon à assurer l'équité en consommation d'énergie entre les nœuds.

Inconvénients du routage à contrôle de flux

- Les protocoles ne précisent pas comment les chemins sont établis.
- Des informations sur la topologie du réseau sont indispensables, ce qui n'est pas adapté aux RCSFs à grande échelle.
- L'adaptation du trafic à l'énergie résiduelle des capteurs n'est pas dynamique. En effet, dans le cas où un paquet trouve un nœud qui possède des voisins épuisés, ce paquet ne peut pas changer son itinéraire fixé par la source.

2.2.2.3 Routage basé sur la négociation

Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de niveau élevé afin d'éliminer les transmissions de données redondantes par la négociation. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre les décisions de communication en se basant sur les ressources disponibles.

Avantages du routage basé sur la négociation

- Le mécanisme de négociation utilisé permet de réduire le taux de données redondantes transmises et des prises de décisions adéquates suivant les ressources énergétiques disponibles des nœuds.
- L'agrégation utilisée dans les protocoles basés sur la négociation réduit la largeur de la bande passante.

Inconvénients du routage basé sur la négociation

- L'échange de messages de contrôle entre les nœuds cause la congestion du réseau ainsi qu'une perte additionnelle d'énergie.
- Le scénario de négociation entre les nœuds (déterminer les données et les acheminer) produit un retard pour délivrer les données au nœud puits.

2.2.2.4 Routage multi-chemin

Dans ce type de protocoles, la source et la destination sont reliées par des chemins multiples. Plutôt qu'un simple chemin afin d'augmenter la performance du réseau. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la probabilité qu'un chemin alternatif existe entre une source et une destination quand le chemin primaire est défaillant. Ceci peut être augmenté en maintenant les chemins multiples entre la source et la destination aux dépens d'une consommation d'énergie et d'une génération du trafic.

Ces chemins alternatifs sont maintenus par l'envoi périodique des messages. Par conséquent, la fiabilité du réseau peut être augmentée en maintenant les chemins alternatifs les plus récents.

Avantages du routage multi-chemin

- Un mécanisme d'équilibre de charge peut être utilisé pour la répartition du trafic sur les routes, ce qui permet de répartir l'utilisation des ressources des nœuds intermédiaires (énergie) et le débit sur les liens.
- Permet de maintenir plusieurs chemins consommant moins d'énergie pour router les données vers les destinations

Inconvénients du routage multi-chemins

- Le risque de perte des paquets augmente dans le cas où ces derniers sont envoyés sur des chemins ayant des nœuds communs qui peuvent tomber en panne.
- L'utilisation de plusieurs chemins nécessite de les maintenir, ce qui consomme énormément d'énergie.

2.2.3 Classification selon l'établissement des routes

2.2.3.1 Les protocoles de routages proactifs

Lorsque les nœuds de capteur sont déployés sur le terrain, aucun routage vers des nœuds spécifiques ne peut être fait. La solution pour y remédier est d'utiliser pour ce genre de réseau (le réseau ad-hoc) une technique de routage. Les protocoles de routage sont divisés en plusieurs classes.

Un protocole de routage proactif permet d'établir les tables de routage avant toute chose et permet également de connaître, en tout temps, la topologie de notre réseau. [13]

2.2.3.2 Les protocoles de routages 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). Il n'a aucune donnée sur le réseau.

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).

2.2.3.3 Les protocoles de routages hybrides

Ces protocoles combinent les propriétés de base des deux premières classes de protocoles, en un seul. 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 protocole réactif pour les communications interzones.

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 ClusterHead (CH) correspondant. A partir de là, le ClusterHead transmet toutes les données agrégées à une station de base distante. Alors nous pouvons en déduire que les ClusterHead reçoivent et transmettent le plus de données dans un cluster est en proie à une grande consommation d'énergie. Donc il est nécessaire de mettre en place des techniques permettant d'éviter à un ClusterHead de consommer sa capacité énergétique totale.

Pour être utilisé, cette technique de partitionnement en plusieurs zones, confère aux nœuds deux tables de routages. 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 « Gate-way » (portes, relais) entres les différentes zones du réseau.

2.3. Facteurs influant sur la conception d'un protocole de routage

La conception des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs nécessite la prise En compte de plusieurs facteurs. Ces derniers sont d'une grande importance, car ils servent de Directives guidant les concepteurs pour qu'une communication efficace puisse être assurée. En outre, ils peuvent servir de métriques de comparaison entre les différents protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs. Dans ce qui suit, nous exposerons les principaux facteurs qui influencent la conception des protocoles de routages dans les réseaux de capteurs :

2.3.1. Mobilité du réseau

Hormis les très peu installations qui utilisent des capteurs mobiles, la plupart des architectures de réseau supposent que les nœuds capteurs sont stationnaires et d'autre part supporte la mobilité du sink ou du cluster-Head. L'évènement à capturer peut, aussi, être dynamique ou statique. Pour une

application à événements statiques, le réseau travaille en mode réactif. Par contre, une application à événements dynamiques nécessite des signalisations périodiques.

2.3.2. Déploiement des nœuds

Le déploiement des nœuds est une considération importante. Les réseaux de capteurs peuvent être installés d'une manière déterministe ou auto-organisée. Quand le déploiement du réseau est déterministe, les nœuds sont placés manuellement d'une manière prédéterminée. Le routage pourrait suivre les chemins prédéterminés. Quand le déploiement du réseau est auto-organisé, les nœuds sont dispersés aléatoirement dans la région du phénomène à surveiller. Un autre aspect de déploiement consiste à déterminer la nature des nœuds puits ainsi que les nœuds têtes des cellules "cluster-Head" en choisissant des nœuds puissants pour assurer ces rôles.

2.3.3. Consommation d'énergie

Les nœuds capteurs peuvent utiliser leur approvisionnement en énergie pour calculer et transmettre l'information dans un environnement sans fil. Pour cela, les techniques de conservation d'énergie lors de la communication et le calcul sont essentielles. En effet, la durée de vie d'un nœud capteur a une forte dépendance de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs multi-sauts, chaque nœud joue un rôle dual comme un expéditeur et un routeur de données. Le mal-fonctionnement de quelques nœuds capteurs dû à la défaillance (à cause de la diminution totale d'énergie) peut causer les changements topologiques cruciaux.

2.3.4. Modèle de livraison de données

Le modèle de renvoi des données captées constitue un autre facteur important qui affecte les performances du protocole de routage utilisé. Le modèle de délivrance des données peut être classé dans l'une de ces catégories : continu (time-driven), événementiel (event-driven), orienté requête (query-driven) et hybride. Le modèle de la livraison continu convient aux applications qui nécessitent des données capturées périodiquement. Dans les modèles événementiels et orientés requêtes, les nœuds capteurs réagissent immédiatement et soudainement lors d'un changement rigoureux de valeur d'un attribut senti dû à l'occurrence de certains événements ou requêtes produites par la station de base. Ces modèles sont bien appropriés aux applications ayant des exigences temps réel. Une combinaison des modèles précédents est également possible. Le protocole de routage est fortement influencé par les modèles de données rapportées concernant la consommation d'énergie et la stabilité des routes.

2.3.5. Hétérogénéité Nœud/Lien

Plusieurs études ont supposé qu'un réseau de capteurs est constitué de nœuds homogènes ayant les mêmes capacités en termes de calcul, de transmission et d'énergie disponible. Cependant, selon

l'application, un nœud capteur peut avoir des rôles délégués. L'existence d'un ensemble de capteurs hétérogènes soulève beaucoup de questions techniques liées au routage de données. Par exemple, quelques applications pourraient exiger divers types de capteurs pour surveiller la température, la pression et l'humidité de l'environnement et capturer l'image ou le cheminement visuel des objets mobiles. Ces capteurs spéciaux peuvent être déployés comme ils peuvent inclure les différentes fonctionnalités (un nœud peut être équipé de plusieurs unités de sensation différentes). Même le captage et la délivrance des données peuvent être produits par ces capteurs à différents taux. Par exemple, les protocoles hiérarchiques indiquent des nœuds cluster-Head qui sont différents des nœuds capteurs normaux. Ces cluster-Head peuvent être plus puissants que les autres nœuds capteurs en terme d'énergie, de bande passante et de mémoire. Par conséquent, ils sont chargés de la transmission des données à la station de base.

2.3.6. Tolérance aux fautes

Quelques nœuds capteurs peuvent être en panne ou être bloqués à cause du manque d'énergie, de dommage physique ou d'interférence environnementale. La défaillance des nœuds capteurs ne devrait pas affecter la tâche globale du réseau de capteurs. Si plusieurs nœuds sont en panne, les protocoles de routage doivent s'adapter à la formation de nouveaux liens et router les données collectées à la station de base. Ceci peut exiger l'activation d'ajustement de puissance et de vitesse de transmission sur les liens existants pour réduire la consommation d'énergie, ou re-router des paquets à travers des régions du réseau où plus d'énergie sera disponible.

2.3.7. Scalabilité

Les applications des RCSF nécessitent en général un déploiement dense des nœuds. Les protocoles de routage doivent donc être très scalables. Autrement dit, les protocoles de routage ne devraient pas souffrir d'une dégradation de performance dans le cas d'endommagement des nœuds aussi bien qu'avec un nombre plus élevé de nœuds [14].

2.3.8. Connectivité

Le nombre important de nœuds dans un RCSF, fait qu'ils sont généralement dispersés de façon aléatoire, et ne sont pas uniformément répartis sur le champ de captage. Ce qui implique que certaines régions du champ de déploiement puissent bénéficier d'une meilleure connectivité. Par conséquent, les protocoles de routage conçus pour les RCSF doivent avoir une capacité d'auto organisation qui les adapte à la distribution aléatoire des nœuds et à la topologie dynamique du réseau.

2.4. Métriques de routage

Cette section étudie les métriques communes utilisées pour mesurer l'efficacité des Protocoles de routage. Un calcul de métrique est un algorithme qui traite un coût associé à un chemin de routage. Les

protocoles de routage permettent aux nœuds de comparer les métriques calculées afin de déterminer les routes optimales à emprunter. Plus la métrique est optimale, plus le protocole de routage considère que la probabilité d'atteindre le nœud puits à travers ce nœud intermédiaire est grande [15].

Plusieurs métriques peuvent affecter le routage en termes d'énergie, délai, longueur du chemin, etc. De plus, elles peuvent être considérées seules ou combinées (hybrides).

2.4.1. Métriques pour la consommation énergétique

Les protocoles de routage utilisent cet ensemble de métriques pour minimiser la consommation d'énergie pendant le routage. L'idée est de calculer l'énergie disponible pour chaque nœud du réseau et l'énergie nécessaire pour les transmissions des paquets entre une paire de nœuds. Les routes entre les nœuds et le puits sont établies et chacune d'elles est caractérisée par la somme des énergies disponibles des nœuds qui la constituent et par la somme des énergies nécessaires des liaisons qui la construisent. La consommation d'énergie suit plusieurs approches dont nous pouvons citer :

2.4.1.1. Considération de puissance

La route choisie est celle caractérisée par la somme la plus élevée des énergies disponibles des nœuds.

2.4.1.2. Considération du coût

La route choisie est celle caractérisée par la plus petite somme des énergies nécessaires pour les transmissions.

2.4.1.3. Considération de puissance et du coût

Cette métrique est la combinaison des deux métriques précédentes. La route choisie est celle caractérisée par la plus petite somme des énergies nécessaires des liaisons et la plus grande somme des énergies disponibles des nœuds.

2.4.2. Route à nombre de sauts minimum

La route sélectionnée est celle qui traverse un nombre minimum de nœuds intermédiaires pour atteindre le nœud puits. Cette métrique est utilisée par les protocoles de routage pour minimiser le nombre de sauts pendant le routage.

2.4.3. Perte de paquets

Les protocoles de routage utilisent cette métrique dans le but de minimiser le nombre de paquets de données perdus lors du transfert depuis une source vers une destination [16].

L'idée est de calculer le ratio des paquets perdus et des paquets émis transitant dans le réseau. Autrement dit, on calcule le nombre de paquets perdus sur le nombre de paquets transmis lors d'une transmission. Dans le cas où le taux de perte de paquets est élevé, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes qui permettent de minimiser les collisions.

3. Selon le modèle de livraison de données

Il est possible de distinguer trois modèles de livraison de données : event driven, query driven, et le modèle continu.

3.1. Event driven

La génération et la transmission des paquets de données sont commandés par l'apparition d'un événement dans le réseau. La plupart des applications event-driven sont des applications intolérantes aux délais (temps réel), critiques et interactives [17]. Au lieu d'avoir un nœud émetteur et un autre récepteur de l'information, on trouve un nœud récepteur (le nœud de contrôle sink) et un groupe de nœuds capteurs, se trouvant proches de l'événement, qui sont tous des émetteurs de la même information. Pour ce modèle, la réussite de ces applications repose essentiellement sur la détection de l'événement et la rapidité des prises de décisions nécessaires pour assurer l'aspect temps réel des applications. L'inconvénient majeur de ce modèle est la redondance des données. En effet, les nœuds excités par le même événement envoient la même information au nœud de contrôle (sink). Pour cela, un protocole de routage basé sur la négociation des données est recommandé.

3.2. Query driven

Le modèle query driven est semblable au modèle event-driven sauf que la collecte des informations sur l'état de l'environnement est initiée par des interrogations envoyées par le nœud sink tandis que dans le modèle event-driven, elle est déclenchée suite à un événement détecté. La plupart des applications query-driven sont des applications interactives, critiques, de non bout en bout et leur tolérance aux délais dépend de l'urgence de l'interrogation [18]. Notons que le modèle query-driven peut être utilisé pour contrôler et reconfigurer les nœuds. Par exemple, le sink peut envoyer des commandes au lieu des interrogations pour modifier le programme d'un nœud capteur, modifier son taux de trafic ou son rôle. Seul le nœud capteur jouant le rôle de sink est autorisé à émettre des demandes d'interrogations ou des commandes.

3.3. Le modèle continu

Dans le modèle continu, les nœuds capteurs envoient les informations d'une manière continue au sink suivant un volume de trafic prédéterminé. Le processus d'acheminement des données à travers les nœuds du réseau peut prendre quatre (04) formes distinctes ; dans les architectures plates, les capteurs peuvent communiquer directement avec le puits en utilisant une forte puissance de transmission ou bien via un mode

multi-sauts en utilisant une puissance faible. Alors que dans les architectures hiérarchiques, les capteurs se structurent en groupes dits clusters où seuls les cluster-heads peuvent communiquer avec le puits directement ou bien en mode multi-sauts ; la communication intra-cluster, quant à elle, peut être en un seul-saut ou en multi-sauts.

4. Conclusion

Le routage dans les réseaux de capteurs est un problème complexe car nous devons assurer la fiabilité de livraison de données tout en consommant le minimum d'énergie. En outre, les protocoles de routage conçus pour les réseaux ad-hoc ne sont pas recommandés pour les RCSFs car ces derniers sont composés de noeuds à ressources limitées. Plusieurs protocoles de routage ont été proposés pour les réseaux de capteurs. Ils peuvent être classés en plusieurs catégories selon le mode d'établissement des chemins, l'architecture du réseau, le mode de fonctionnement du protocole et le paradigme de communication.

Nous avons également vu précédemment que la topologie plate du protocole de routage fournit de bonnes performances pour un réseau d'une taille petite ou moyenne.

Cependant, lorsque la taille du réseau augmente, ses performances se dégradent vu le trafic de données qui augmente entre les noeuds. Afin de pallier à cet inconvénient, les chercheurs ont proposé l'architecture hiérarchique qui vise à augmenter la scalabilité du réseau et optimiser l'utilisation des ressources énergétiques. Parmi les méthodes de hiérarchisation, nous allons traiter le clustering qui se révèle une bonne méthode de routage qui permet la conservation de l'énergie dans les réseaux de capteurs.

The image features a white rectangular page with a thin gold border, set against a light-colored, textured background. The page is decorated with watercolor illustrations of blue leaves, some in the top right and bottom left corners. The text is centered on the page in a blue, serif font.

Chapitre III :
Le Protocole LEACH



Introduction

Dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN), l'optimisation de la consommation énergétique constitue un défi majeur en raison des ressources limitées des nœuds capteurs. Le protocole LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) a été l'un des premiers protocoles de routage hiérarchiques conçus pour améliorer l'efficacité énergétique. Il repose sur la technique de clustering pour réduire la quantité de données transmises au nœud de base (base station) et ainsi prolonger la durée de vie du réseau.

3.1. Principe du Protocole LEACH

LEACH est un **protocole de routage auto-adaptatif** et hiérarchique. Il divise le réseau en groupes appelés **clusters**. Chaque cluster possède un **chef de cluster** (Cluster Head – CH), responsable de collecter, agréger et transmettre les données des nœuds membres vers la station de base.

Objectifs principaux :

- Minimiser la consommation d'énergie globale.
- Répartir la charge énergétique de façon équitable entre les nœuds.
- Assurer une couverture fiable tout en réduisant le volume de données transmises.

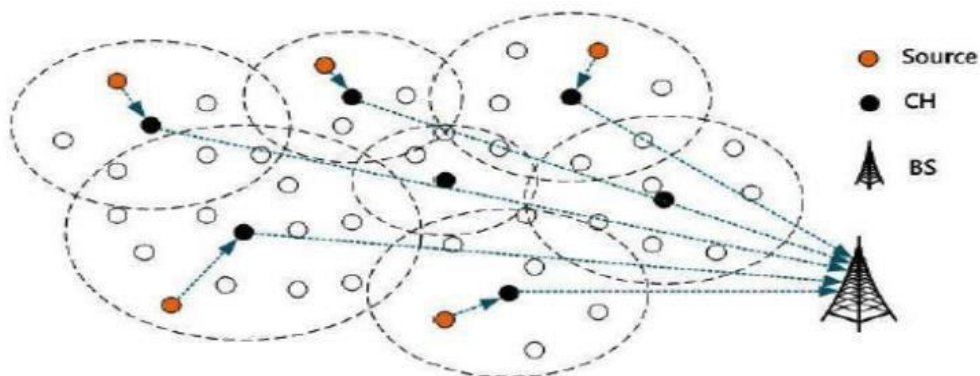


Figure 3.1 Architecture de routage hiérarchique.

3.2. Fonctionnement de LEACH

LEACH fonctionne par **cycles**, chacun est divisé en deux phases :

a. Phase de Configuration (Setup Phase)

Le but de cette phase est la construction des clusters en choisissant les chefs et en établissant la politique d'accès au média au sein de chaque groupe. Cette phase commence par la prise

de décision locale pour devenir cluster-head. Chaque noeud n choisit un nombre aléatoire, si ce nombre est inférieur à une valeur $T(n)$, le noeud devient cluster-head. $T(n)$ est définie comme suit :

- Sélection aléatoire des chefs de cluster selon une probabilité prédéfinie.
- Les nœuds élisent leur chef de cluster en fonction de la puissance du signal reçu.
- Les clusters sont formés de manière distribuée.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{si } n \in G \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec :

- P : pourcentage désiré de cluster-heads pendant un round.
- r : numéro du round.
- G : l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élu Cluster-Head (CH) pendant les $1/P$ rounds précédents. Par la suite, chaque nœud qui s'est élu cluster-Head émet un message de notification. Les nœuds membres récoltent les messages de notification, et décident leur appartenance à un cluster. La décision est basée sur l'amplitude du signal reçu : le Cluster-Head ayant le signal le plus fort est choisi (i.e. le plus proche). En cas d'égalité, un chef aléatoire est choisi. Chaque membre informe son chef de sa décision. Toutes les communications précédentes étant faite dans une topologie plate, la méthode CSMA doit être employée. Par la suite, les communications au sein d'un cluster peuvent être faites avec la méthode TDMA. Pour cela, chaque chef établie un schedule TDMA pour ses membres, en indiquant pour chaque nœud son slot d'émission. Ce schedule est envoyé aux membres.

b. Phase de Transmission (Steady-State Phase)

En utilisant le schedule TDMA, les membres émettent leurs données captées pendant leurs propres slots. Cela leur permet d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots réservés, afin d'économiser leur énergie. Ces informations sont ensuite agrégées, pour être transmises au collecteur (sink). Cette communication, entre un cluster-head et le collecteur, se fait d'une manière directe, i.e. : le cluster-head adapte son émetteur radio afin d'atteindre directement le collecteur.

- Les nœuds envoient leurs données au chef de cluster selon un planning **TDMA** (Time Division Multiple Access).
- Le chef de cluster agrège les données et les transmet à la station de base.
- Cette phase est plus longue pour maximiser l'économie d'énergie.

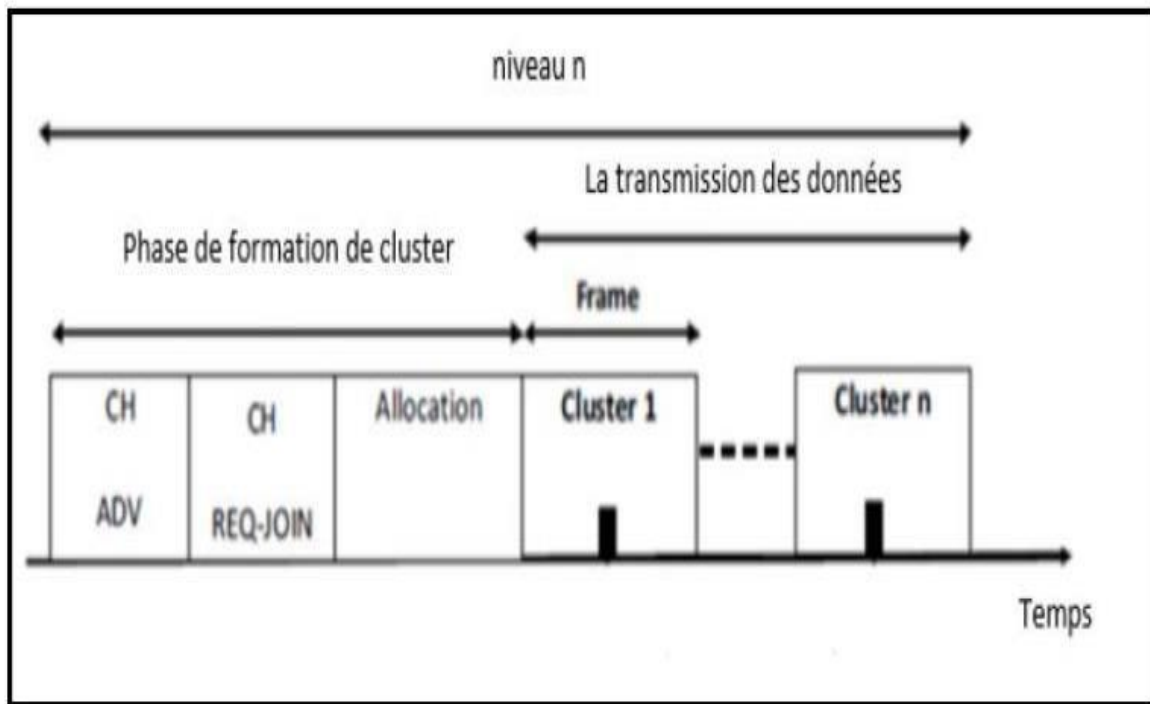


Figure 3.2. Formations de clusters et transmission de données.

3.3. Sélection des Chefs de Cluster

La sélection est probabiliste et vise à faire élire un chef de cluster à chaque tour (round) entre les nœuds pour équilibrer la dépense énergétique. Un nœud devient chef avec une certaine **probabilité P**. Une fonction de seuil $T(n)$ est utilisée pour décider si un nœud peut être élu :

- P est la proportion souhaitée de chefs de cluster (exemple $p=0.1$)
- r est le numéro actuel du round.
- G est l'ensemble des nœuds n'ayant pas été chefs dans les tours précédents.

Algorithme complet de LEACH – Pseudo-code

Algorithme LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Entrées :

N : ensemble des nœuds capteurs

BS : station de base (Base Station)

P : probabilité souhaitée d'avoir un chef de cluster

Rounds_max : nombre total de rounds (cycles)

Sortie :

Début Transmission efficace des données vers BS

Pour chaque nœud $n \in N$ **faire**

n.etat \leftarrow actif

n.role \leftarrow "membre"

n.energie \leftarrow energie_initiale

FinPour

Pour round de 1 à Rounds_max **faire**

// Phase 1 : SETUP (Configuration)

$G \leftarrow \{\text{nœuds } n \in N \mid n \text{ n'a pas été chef depuis } 1/P \text{ rounds}\}$

Pour chaque $n \in G$ **faire**

Générer un nombre aléatoire rand $\in [0,1]$

Si rand $<$ T(n) **alors**

n.role \leftarrow "chef de cluster"

n.chef \leftarrow n // il est son propre chef

FinSi

FinPour

faire **Pour** chaque $n \in N$ tel que n.role \neq "chef de cluster"
Trouver le chef de cluster le plus proche (par distance)

Associer n à ce chef

n.chef \leftarrow id_chef_proche

FinPour

Créer planification TDMA pour chaque cluster

// Phase 2 : STEADY STATE (Transmission des données)

Pour chaque slot TDMA **faire**

Pour chaque nœud $n \in N$ tel que n.role = "membre"

faire

Si n.etat = actif **alors**

Envoyer données à n.chef

Réduire n.energie selon consommation_tx


FinSi

FinPour

Pour chaque chef de cluster $c \in N$ **faire**

Agréger données reçues

Envoyer données agrégées à la station de base BS



```
consommation_tx_longue_distance
Réduire c.energie selon
FinPour
FinPour
// Mise à jour de l'état énergétique
Pour chaque n ∈ N faire
    Si n.energie ≤ 0 alors
        n.etat ← inactif
    FinSi
FinPour
FinPour
```

FinAlgorithme

Explication des éléments clés du pseudo-code :

- **T(n)** : fonction de seuil utilisée pour déterminer si un nœud peut devenir chef de cluster.
- **G** : ensemble temporaire des nœuds éligibles pour devenir chefs.
- **Planification TDMA** : méthode pour éviter les collisions entre transmissions.
- **Agrégation des données** : les chefs de cluster fusionnent les données pour réduire la redondance.
- **Consommation_tx** : dépend de la distance et de la taille du message (formule de l'atténuation radio).

3.4. Avantages de LEACH

- **Économie d'énergie** grâce à l'agrégation des données.
- **Équilibrage de charge** par la rotation des chefs.
- **Architecture distribuée**, donc robuste aux pannes locales.
- Réduction significative des transmissions longues distances.

4. Limitations de LEACH

- Ne convient pas bien aux réseaux à **grande échelle**.
- Ne prend pas en compte la **position géographique** ou le **niveau de batterie** pour choisir les chefs.
- Ne garantit pas une couverture optimale du réseau.
- Transmission directe à la station de base non viable pour les grandes distances.

Exemple de mise en œuvre de LEACH :

Le script suivant génère une **illustration visuelle simple du protocole LEACH**, montrant :


- les nœuds capteurs,
- les chefs de cluster,
- la station de base,
- les communications entre les nœuds et les chefs,
- et les transmissions des chefs vers la station.

Début

- Déterminer les paramètres du réseau
- Déterminer le nombre de nœuds (num_nodes)
- Déterminer la taille du réseau (area_size)
 - Générer les positions aléatoires des nœuds
- nodes_x = np.random.rand(num_nodes) * area_size
- nodes_y = np.random.rand(num_nodes) * area_size
 - Définir les chefs de cluster
 - Définir la position de la station de base (sink)
- sink_x, sink_y (à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone d'intérêt)
 - Création du graphique
- Création des légendes et des noms de figures.
 - Tracer les nœuds
 - Tracer les chefs de cluster
 - Tracer la station de base
 - Lignes de communication : nœuds vers chefs de cluster

for i in range(num_nodes):

- Trouver le chef de cluster le plus proche



- Lignes de communication : chefs vers station de base

```
for i in range(len(cluster_heads_x)):
```

- Légende
- Endfor**

Fin

5. Améliorations et modifications possibles du protocole LEACH

Plusieurs variantes ont été proposées pour surmonter les limites de LEACH :

- **LEACH-C (Centralized LEACH)** : sélection des chefs de cluster par la station de base.
- **LEACH-F** : clusters fixes mais rotation du chef.
- **Multi-hop LEACH** : permet des transmissions sur plusieurs sauts pour les grands réseaux.
- **S-LEACH** : prend en compte l'énergie résiduelle des nœuds pour la sélection.

5.1. LEACH-C (Centralisé)

- **Principe** : la sélection des chefs de cluster est effectuée par la station de base (BS), en tenant compte de la position géographique et de l'énergie résiduelle des nœuds.
 - **Avantage** : les clusters sont mieux équilibrés.
 - **Inconvénient** : nécessite que les nœuds envoient leurs informations à la BS → surcoût énergétique initial.
-

5.2. S-LEACH (Solar-aware LEACH)

- **Principe** : privilégie les nœuds équipés de panneaux solaires pour devenir chefs de cluster.
- **Avantage** : améliore la durée de vie du réseau en exploitant l'énergie renouvelable.
- **Utilisé dans** : les applications environnementales ou extérieures (smart farming, surveillance météo).

5.3. Multi-hop LEACH

- **Principe** : les chefs de cluster peuvent relayer leurs données à travers d'autres chefs vers la station de base (au lieu de transmission directe).
- **Avantage** : utile dans les grands réseaux ou quand la BS est distante.
- **Problème résolu** : évite que les chefs trop éloignés consomment toute leur énergie en transmission longue distance.

5.4. LEACH-E (LEACH à Énergie résiduelle)

- **Principe** : la sélection des chefs de cluster dépend de l'énergie résiduelle des nœuds.
- **Avantage** : évite que des nœuds presque déchargés soient élus chefs.
- **Amélioration de la longévité du réseau** : meilleure répartition énergétique.

5.5. Q-LEACH (Quality of Service aware LEACH)

- **Principe** : prend en compte plusieurs facteurs (distance, énergie, taux de perte de paquets) pour élire les chefs.
- **Avantage** : améliore la fiabilité des données transmises.

5.6. LEACH avec mobilité (M-LEACH)

- **Principe** : adapté à des réseaux où les nœuds ou la station de base peuvent se déplacer.
- **Spécificité** : met à jour dynamiquement les clusters en fonction des nouvelles positions.

5.7. LEACH avec Compte de Chef (LEACH-B)

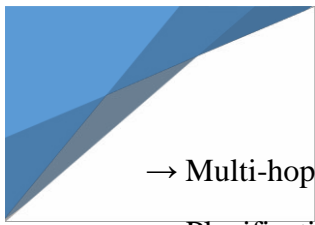
- **Principe** : prend en compte le nombre de fois où un nœud a été chef dans le passé pour éviter une trop grande répétition.
- **But** : équité énergétique à long terme.

5.8 Exemple de combinaison

Il est possible de combiner plusieurs modifications pour créer un protocole personnalisé. Par exemple :

LEACH hybride :

→ Sélection des chefs basée sur l'énergie résiduelle + distance à la station de base



→ Multi-hop entre chefs

→ Planification TDMA améliorée avec détection d'interférences

6. Conclusion

LEACH est un protocole pionnier dans le domaine du routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil. Bien qu'il présente certaines limites, il constitue une base solide pour de nombreuses variantes plus avancées. Sa simplicité, son adaptabilité et son efficacité énergétique expliquent pourquoi il reste largement étudié dans la recherche et les applications industrielles.

The background features a light, textured surface with a thin, light-colored border. Watercolor-style illustrations of blue leaves are positioned in the top-right and bottom-left corners, framing the central text area.

Chapitre : IV

*Implémentation du protocole
LEACH sous MATLAB*

Introduction

Le protocole LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est un protocole de routage hiérarchique conçu pour améliorer la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil (WSN). Son objectif principal est de minimiser la consommation d'énergie en répartissant équitablement la charge énergétique entre les nœuds. Ce protocole repose sur la formation dynamique de clusters et la rotation périodique des chefs de cluster (Cluster Heads - CH).

Ce chapitre présente l'implémentation du protocole LEACH à l'aide de MATLAB, en simulant un réseau de capteurs répartis dans une zone de déploiement fixe. L'accent est mis sur la modélisation du comportement des nœuds, le processus d'élection des chefs de cluster, la communication intra- et inter-cluster, ainsi que le calcul de la consommation énergétique.

2. Environnement matériel :

L'application a été développée sur un PC (Laptop-0EVMP5B1) ayant les caractéristiques suivantes :

* **Processeur:** Intel(R) Core(TM) i3 CPU M 380 @ 2.53GHz 2.53 GHz.

* **Mémoire:** 4,00 Go (3,80 Go utilisable).

* **Disque Dure:** HDD 300 Go.

* **Système d'exploitation:** Windows 10 Professionnel 64 bit.

4.1. Hypothèses et Paramètres de Simulation

Avant de coder le protocole LEACH, il est nécessaire de définir certaines hypothèses :

- Le réseau est composé de N nœuds aléatoirement déployés dans une zone 2D.
- Un nœud station de base (Base Station - BS) est situé en dehors ou au centre de la zone.
- Chaque nœud possède une énergie initiale E_0 .
- Les nœuds sont statiques et possèdent des capacités de communication équivalentes.

- Le modèle de consommation d'énergie est basé sur le modèle radio à deux niveaux (free space / multipath).

Paramètres typiques :

```

N = 100; % Nombre de nœuds
area = 100; % Zone de 100m x 100m
BS_x = 50; BS_y = 50; % Coordonnées de la station de base
E0 = 0.5; % Énergie initiale de chaque nœud (Joules)
p = 0.05; % Probabilité optimale de devenir CH
rounds = 1000; % Nombre de rounds de simulation
    
```

4.2. La modélisation énergétique

Le modèle utilisé pour simuler la consommation énergétique est le modèle radio suivant :

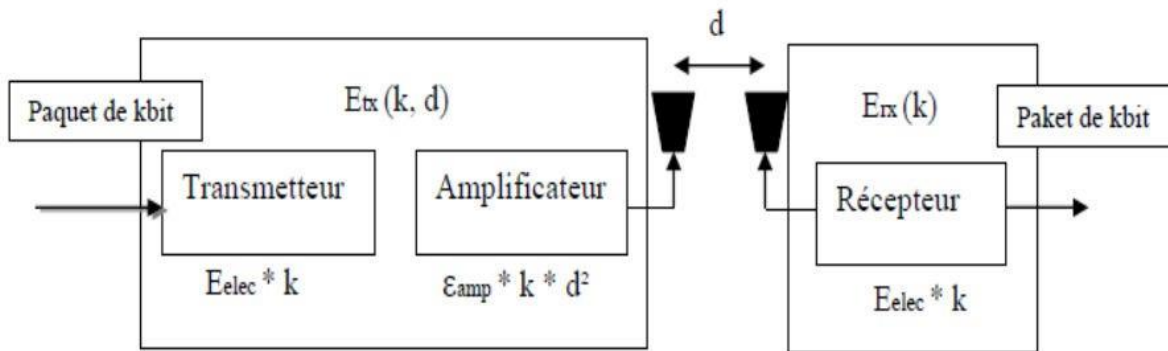


Figure 4.1. Le modèle radio.

Énergie dépensée par un nœud pour transmettre un message de k bits sur une distance d :

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} k * E_{elec}(k, d) + k * \epsilon_{amp} * d^2 & \text{si } d < d_{crossover} \quad (1) \\ k * E_{elec}(k, d) + k * \epsilon_{m_{ch}} * d^4 & \text{sinon} \quad (2) \end{cases}$$

Avec :

$$d_{crossover} = \sqrt{\frac{\epsilon_{amp}}{\epsilon_{m_{ch}}}}$$

Énergie dépensée par le récepteur pour k bits :

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

Avec:

E_{Tx} : Est la consommation d'énergie de l'émetteur qui envoie un message de kbits au récepteur.

E_{Rx} : Est la consommée d'énergie du récepteur qui reçoit un k-message de bit.

E_{elec} : est la consommation d'énergie du circuit d'émission-réception sans fil.

k : Taille de message qui contient le nombre de bits envoyés.

d : La distance mesurée entre la source et la destination.

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

ϵ_{amp} : Facteur d'amplification dans l'espace libre.

ϵ_{m_ch} : Facteur d'amplification dans l'espace multi-chemins.

E_{Tx_amp} : L'énergie d'amplification.

Dans ce travail de simulation, nous avons utilisé les paramètres définis ci-dessous :

Constantes typiques :

```
E_elec = 50e-9;  
E_fs = 10e-12;  
E_mp = 0.0013e-12;  
d0 = sqrt(E_fs/E_mp);
```

4.3. Implémentation du Protocole LEACH

4.3.1. Initialisation des Nœuds

```
nodes = struct();  
for i = 1:N  
    nodes(i).x = rand() * area;  
    nodes(i).y = rand() * area;  
    nodes(i).E = E0;  
    nodes(i).type = 'N'; % N = normal, C = CH  
end
```

4.3.2 Boucle Principale (Rounds)

```
for r = 1:rounds  
    % Élection des CH  
    G = find([nodes.E] > 0); % Nœuds encore vivants  
    for i = G
```

Chapitre IV : Implémentation du protocole LEACH sous MATLAB

```
if mod(r, round(1/p)) == 0
    nodes(i).G = 0; % Réinitialisation
end
if nodes(i).G <= 0 && rand() <= p
    nodes(i).type = 'C';
    nodes(i).G = round(1/p) - 1;
else
    nodes(i).type = 'N';
    nodes(i).G = max(0, nodes(i).G - 1);
end
end

% Attribution des nœuds aux CH
CHs = find(strcmp({nodes.type}, 'C'));
for i = 1:N
    if nodes(i).E <= 0 || strcmp(nodes(i).type, 'C')
        continue;
    end
    d_min = inf;
    for ch = CHs
        d = sqrt((nodes(i).x - nodes(ch).x)^2 + (nodes(i).y -
nodes(ch).y)^2);
        if d < d_min
            d_min = d;
            chosen_CH = ch;
        end
    end
    % Transmission au CH
    k = 2000; % bits
    d = d_min;
    if d > d0
        nodes(i).E = nodes(i).E - (E_elec * k + E_mp * k * d^4);
    else
        nodes(i).E = nodes(i).E - (E_elec * k + E_fs * k * d^2);
    end
    nodes(chosen_CH).E = nodes(chosen_CH).E - (E_elec * k);
end

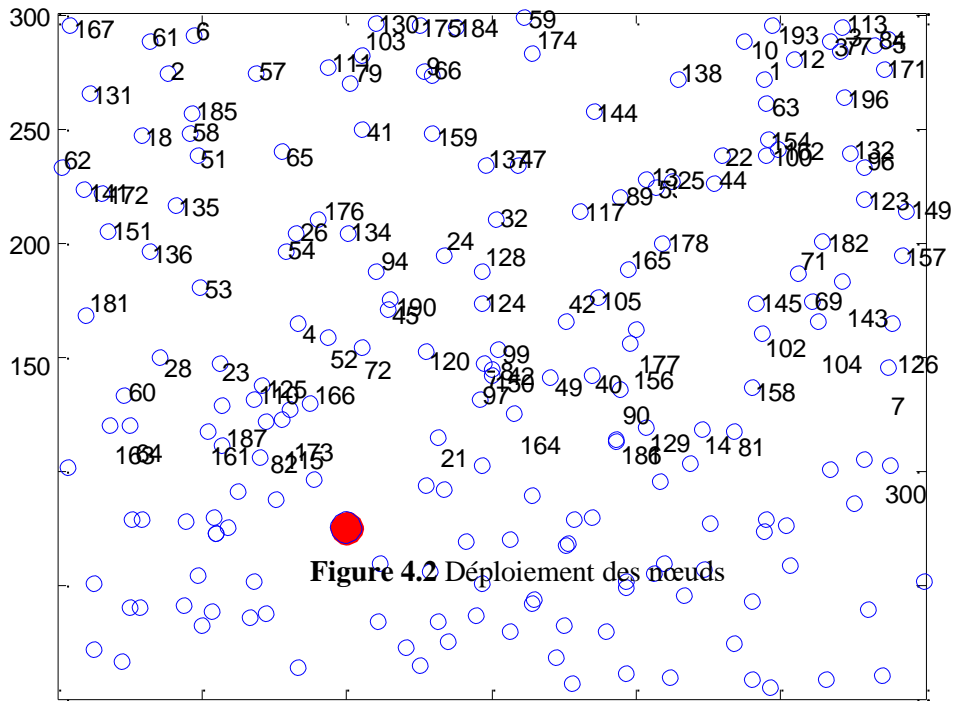
% Transmission des CH à la station de base
for ch = CHs
    if nodes(ch).E <= 0
        continue;
    end
    d_to_BS = sqrt((nodes(ch).x - BS_x)^2 + (nodes(ch).y - BS_y)^2);
    k = 2000;
    if d_to_BS > d0
        nodes(ch).E = nodes(ch).E - (E_elec * k + E_mp * k *
d_to_BS^4);
    else
        nodes(ch).E = nodes(ch).E - (E_elec * k + E_fs * k *
d_to_BS^2);
    end
end

% Suivi des nœuds morts
dead = sum([nodes.E] <= 0);
fprintf('Round %d : %d nœuds morts\n', r, dead);
end
```

4.4. Résultats et Visualisation

Il est possible de tracer l'évolution du nombre de nœuds vivants, la distribution des chefs de cluster, ou encore l'énergie résiduelle moyenne à chaque round :

```
alive_nodes = arrayfun(@(n) n.E > 0, nodes);  
plot(1:N, alive_nodes, 'g*');  
title('État des nœuds après les rounds');  
xlabel('Nœud');  
ylabel('Énergie > 0');
```



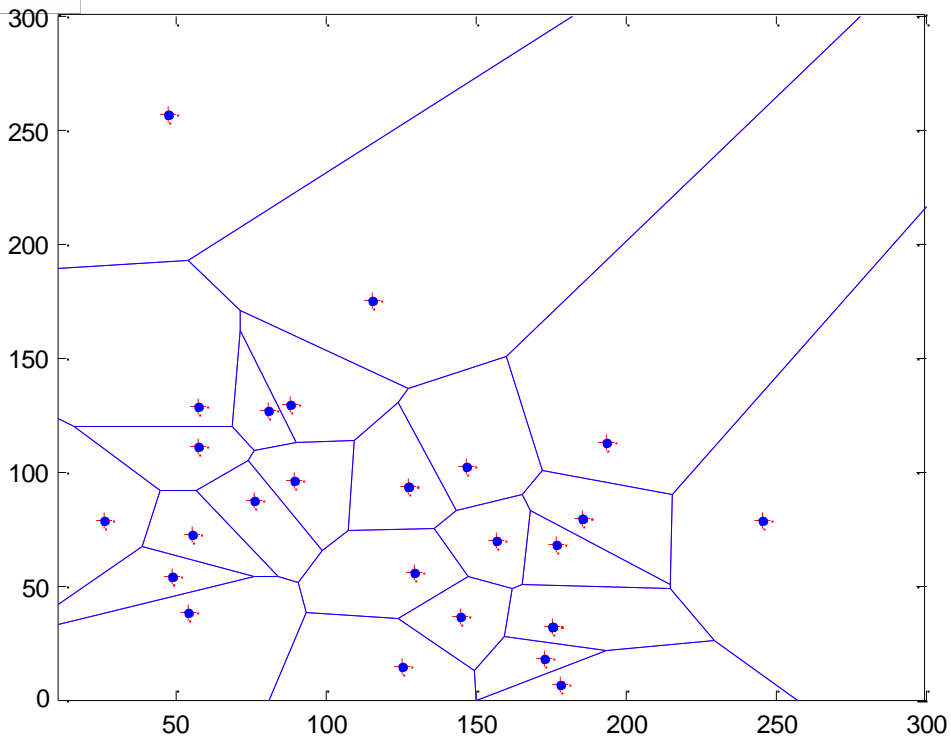


Figure 4.3. Formation des clusters (zone de 300*300)

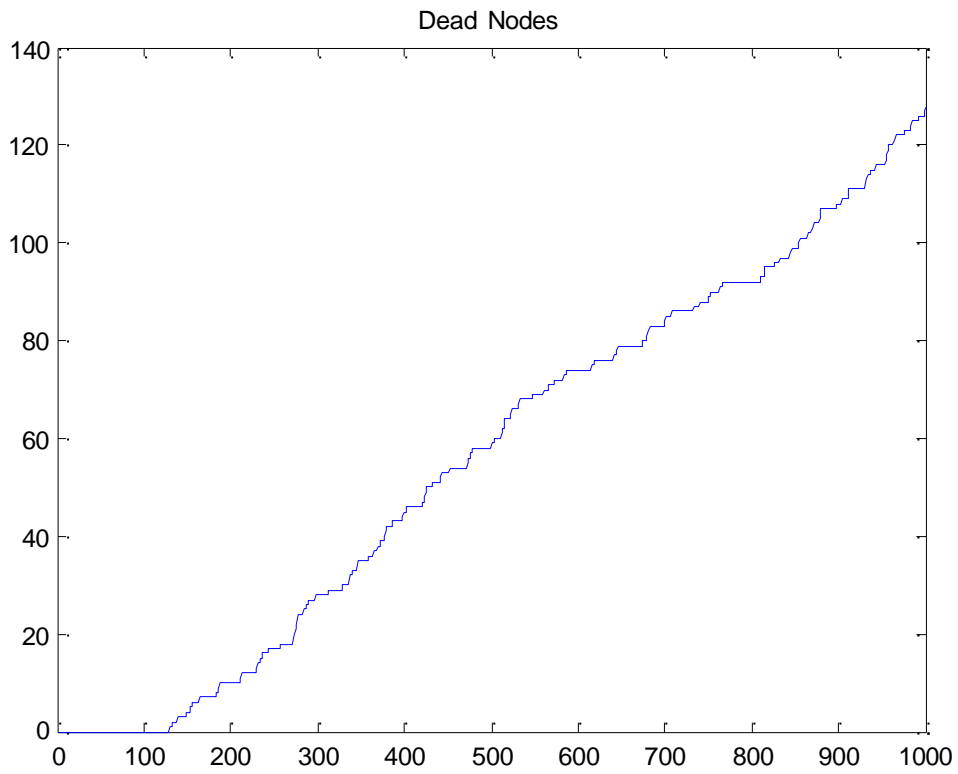


Figure 4.4. Nœuds morts (1000 rounds)

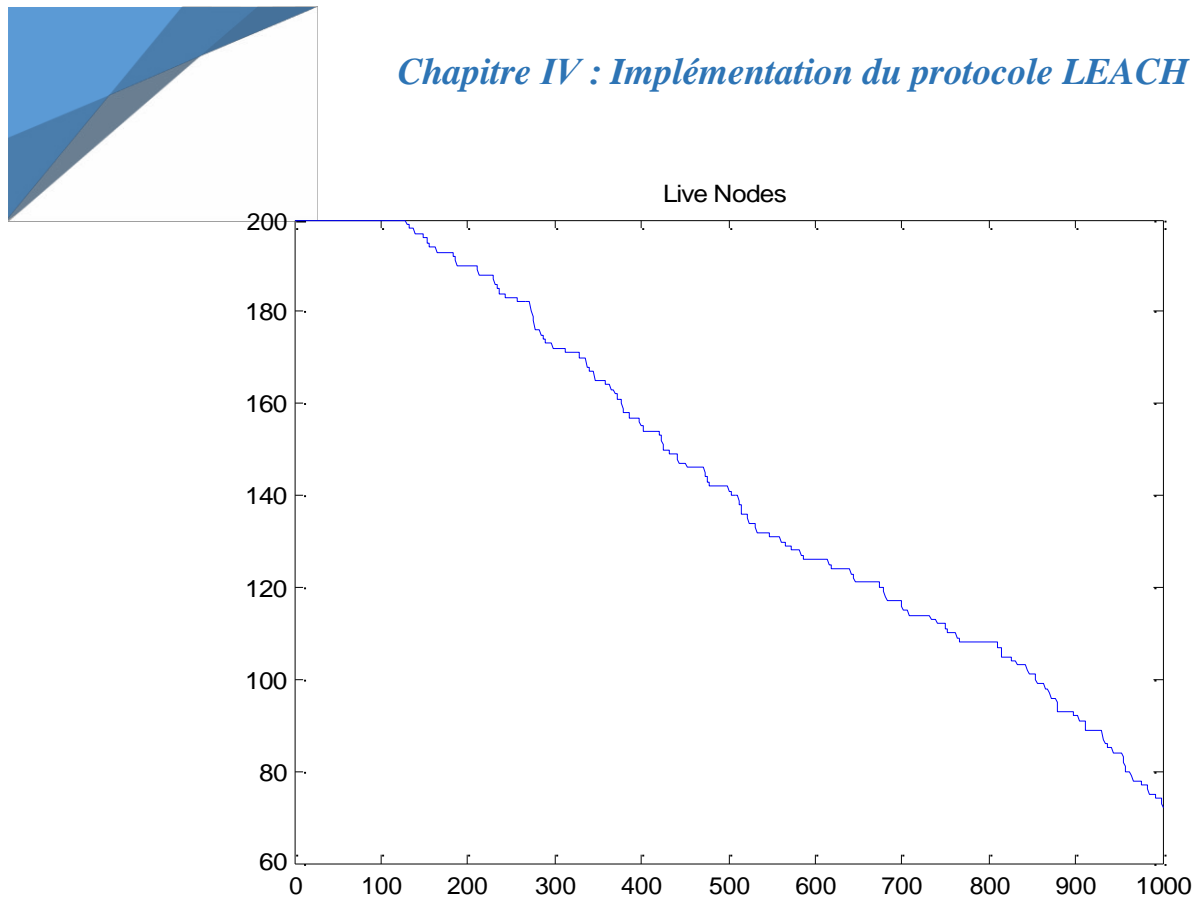


Figure 4.5. Nœuds vivants (1000 rounds)

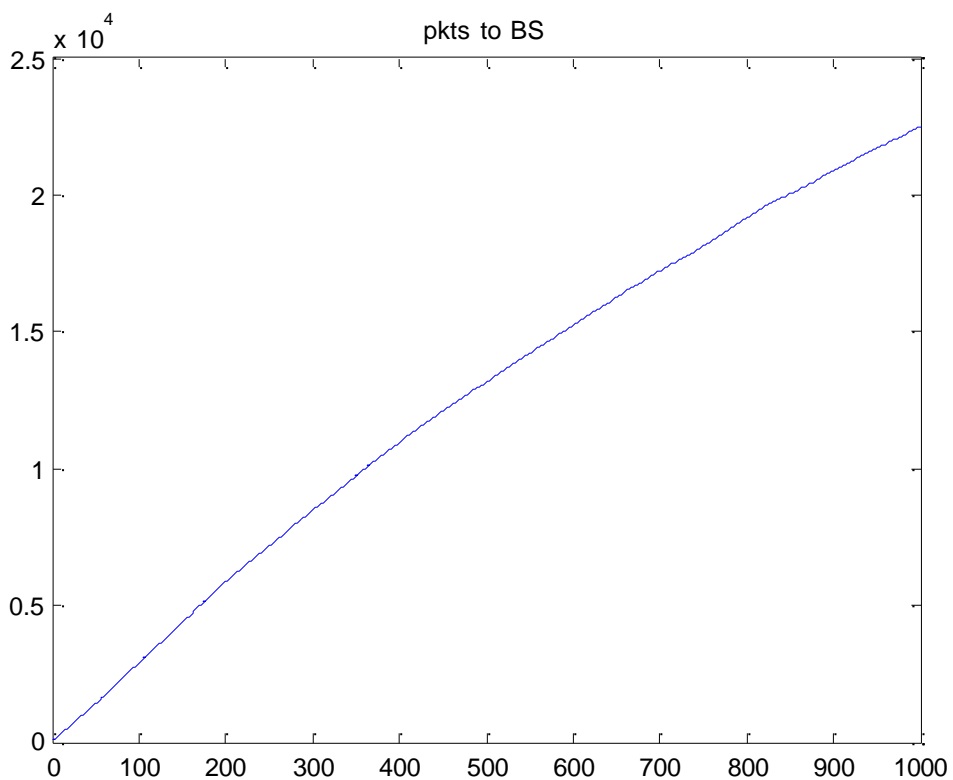


Figure 4.6. Paquets transmis à la Base Station (BS) (1000 rounds)

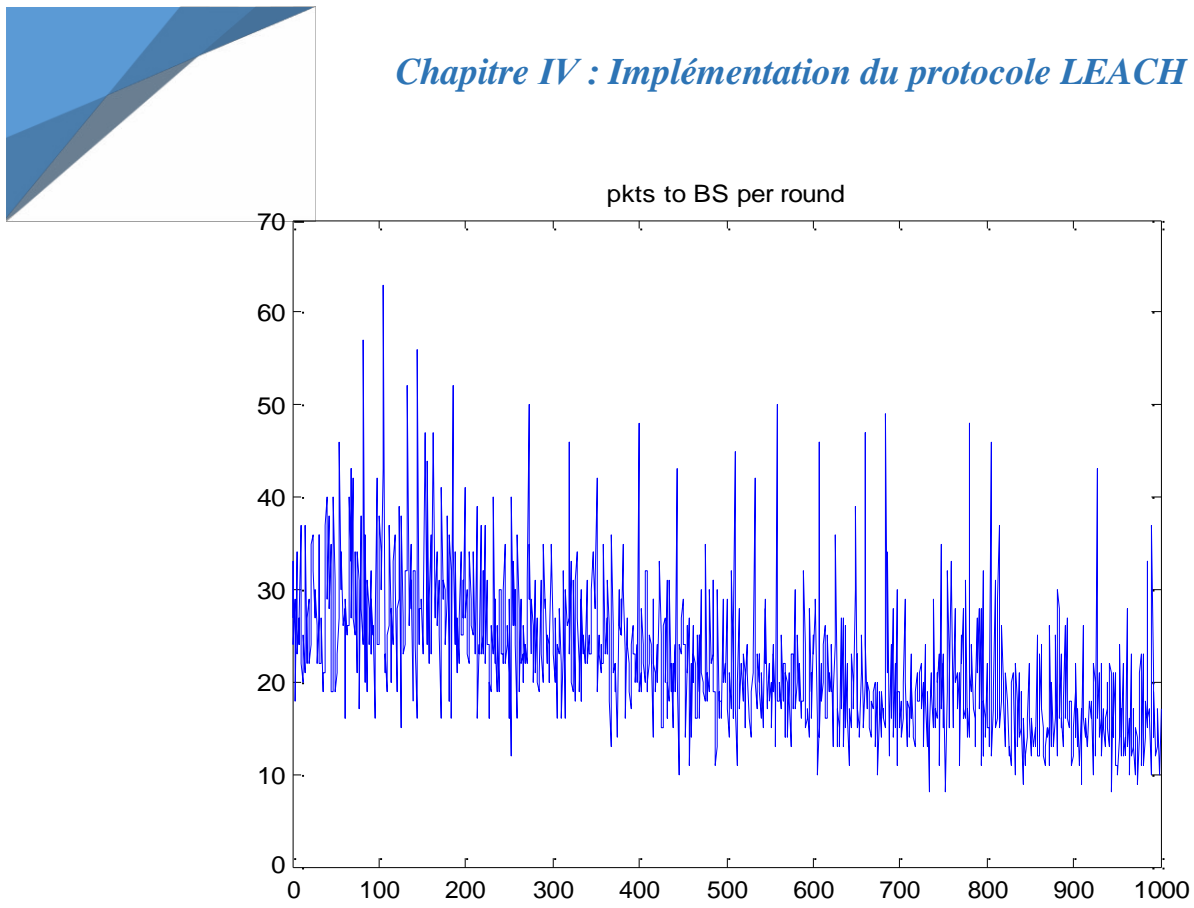


Figure 4.7. Paquets transmis à la Base Station (BS) par round (1000 rounds)

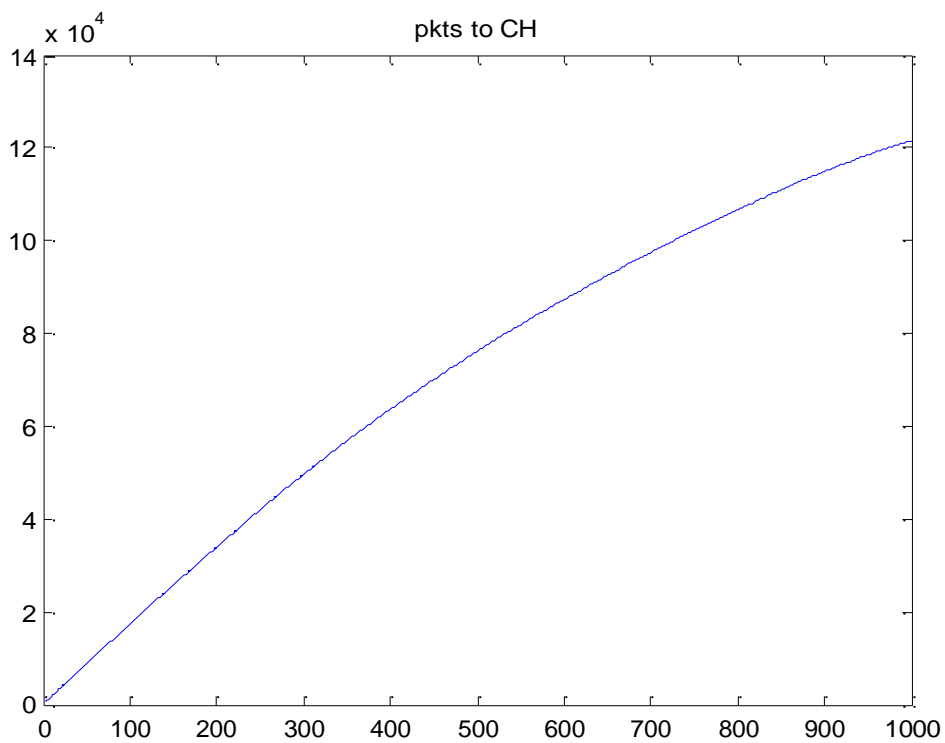


Figure 4.8. Paquets transmis aux CH (1000 rounds)

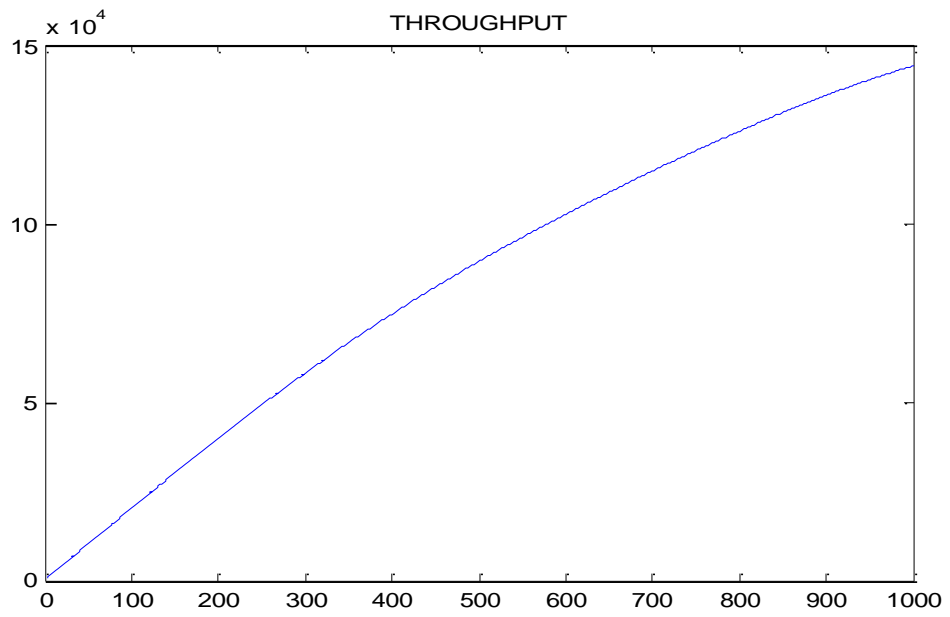


Figure 4.9. Débit du réseau (1000 rounds)

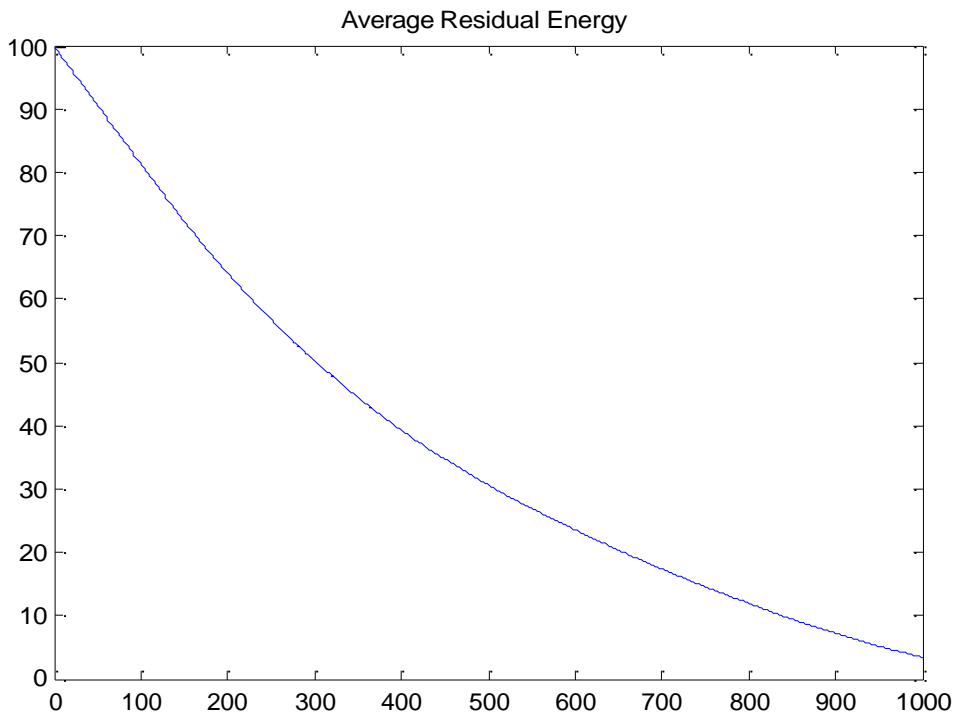


Figure 4.10. Energie residuelle.



5. Conclusion

L'implémentation de LEACH sous MATLAB permet de simuler de manière réaliste le comportement énergétique d'un réseau de capteurs sans fil. Grâce à la rotation des chefs de cluster et à la distribution spatiale des communications, LEACH prolonge considérablement la durée de vie du réseau par rapport aux protocoles classiques. Cette base peut être étendue à des variantes de LEACH, telles que LEACH-C, T-LEACH, ou sLEACH, pour améliorer encore plus l'efficacité énergétique ou la prise en compte de paramètres spécifiques.

The image features a decorative background with a light-colored, marbled texture. In the corners, there are watercolor-style illustrations of blue leaves with detailed vein patterns. A thin, light-colored rectangular border frames the central text area.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés aux réseaux de capteurs sans fil et plus particulièrement les protocoles de routage dans ces réseaux. Une étude détaillée a concerné le protocole hiérarchique LEACH qui compte parmi les pionniers dans ce domaine. Ces réseaux de capteurs ont conduit à une véritable révolution dans la communication sans fil qui a modifié de façon catégorique le recueil et l'exploitation des informations à distance avec un impact positif aussi bien économique que technique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble des réseaux de capteurs sans fil ainsi que leurs caractéristiques théoriques et pratiques tout en présentant les contraintes liées à ces systèmes. Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les architectures génériques de ces réseaux et les possibles topologies de déploiement. Suivi, dans le troisième chapitre, de l'étude détaillée du protocole LEACH. Une implémentation de ce protocole est présentée au quatrième chapitre comportant un ensemble de résultats.

L'inspection manuelle n'est pas toujours possible, les réseaux de capteurs sans fil jouent, ainsi, un rôle essentiel dans les applications de collecte de données fiables et précises. Une consommation d'énergie inutile pourrait entraîner une réduction de la durée de vie du réseau. Plusieurs techniques et protocoles ont été conçus et mis en œuvre comme LEACH, LEACH-F, LEACH-C etc. pour surmonter ce problème, mais elles sont limitées dans leur fonctionnalité. Enfin, nous concluons notre étude du domaine des réseaux de capteurs sans fil en constatant qu'il s'agit d'une nouvelle technologie prometteuse. Elle pourrait être un moyen de contribuer efficacement à réaliser l'Internet intégré. Elle semble être une solution efficace pour de nombreuses applications qui impliquent une surveillance approfondie d'un environnement de déploiement.

Dans les perspectives, nous envisageons d'apporter des améliorations au protocole LEACH portant sur le choix des clusters-Head en rajoutant au réseau des nœuds dont l'énergie initiale suffit à maintenir tout le réseau en vie sans changer de CH. Ceci aurait pour conséquence directe la suppression de la phase d'initialisation prévue dans LEACH pour élire les CH et ferait gagner de l'énergie et du temps.

Reference

[01]. A. BEGHRICHE et A. BILAMI, *Un modèle de confiance pour l'authentification dans un réseau sans-fil Ad hoc*, Journées Ecole Doctorale & Réseaux de Recherche en Sciences et Technologies de l'Information JED'08, Université Annaba, Juin 2008.

[02]. H. JMEL - M. CAUDRON - A. BRISSET - P. M. GUITARD, *Réseaux de capteurs sans-fils*, projet avancé, Université de Lyon, 2008.

[03] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci "A survey on sensor networks", IEEE Communications Magazine, Vol. 40, pp. 102-116, August 2002.

[04]. L. KHELLADI & N. BADACHE, *Les réseaux de capteurs : état de l'art, rapport de recherche*, Université de Bab Ezzouar, 2004.

[05]. M.M. DIOURI, *Réseaux de capteurs sans-fil: routage et sécurité*, mémoire, INSA de Lyon, 2009/2010.

[06] A. Abdelhalim, and B. Mohammed, "Conception d'un algorithme de routage basé sur l'heuristique du recuit simulé pour les réseaux de capteurs à grande échelle Réalisé ", Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, Algeria, pp. 2012–2013, 2013.

[07] YAHIAOUI Nadira and TAFOUKT Meryem, "Routage à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil," Master en Informatique, Université A.MIRA de Béjaia, Algeria, 2012.

[08] Mehiaoui Amina, " Etude comparative entre les deux protocoles de routage LEACH et PEGASIS dans les réseaux de capteurs sans fil, ", mémoire fin d'étude, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID ,TLEMEN, Algeria, 2015.

[09] SAHRAOUI Belkheyr, " La Géo-localisation dans les Réseaux de Capteurs sans Fil " Mémoire de fin d'études, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, Algeria, pp. 2010–2011, 2011.

- [10] Ameer Ahmed Abbasi and Mohamed Younis. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer communications*, 30(14) :2826-2841, 2007.
- [11] K. Akkaya, and M. Younis, “A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks”. *Journal of Ad Hoc Networks*, Vol. 3, No. 3, May 2005, pp. 325-349.
- [12] Mehiaoui Amina, “ Etude comparative entre les deux protocoles de routage LEACH et PEGASIS dans les réseaux de capteurs sans fil, ”, mémoire fin d'étude, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID ,TLEMCEM, Algeria, 2015.
- [13] Kemal Akkaya, Mohamed Younis, “*A survey on routing protocols for wireless sensor networks*”, Department of Computer Science and Electrical Engineering, University of Maryland, 2003.
- [14] Jamil Ibriq, Imad Mahgoub, « *Cluster-based Routing in Wireless Sensor Networks: issues and challenges* », Departement of computer science and engineering, Florida Atlantic University, 2004.
- [15] Richard Draves Jitendra Padhye Brian Zill, “*Comparison of Routing Metrics for Static Multi-Hop Wireless Networks*”, Microsoft Research, SIGCOMM, September 2004.
- [16] Naouel Doufene, Hani Hadjammar, « *Routage dans les réseaux de capteurs : Optimisation du protocole Directed Diffusion* », Projet de fin d'étude, Institut National de formation en Informatique INI, Algérie, 2006.
- [17] Dazhi Chen and Pramod K. Varshney, “*QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey*”, Department of EECS, Syracuse University Syracuse, NY, 2005
- [18] C. INTANAGONWIWAT, R. GOVINDAN, and D.ESTRIN, “ *Directed diffusion: a Scalable and robust communication paradigm for sensor networks*”, Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, pages 55–67, Boston, USA, Août 2000.