

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen  
Faculté des Sciences  
Département d'Informatique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique

*Option: Réseaux et Systèmes et Distribués (R.S.D)*

*Thème*

**Une nouvelle approche de clustering  
pour améliorer les performances des  
réseaux de capteurs sans fil**

Réalisé par :

- DEBBAL Bouchra
- BENDIMERAD Ahlem Ep Kazi-Tani

*Présenté le 06 Juillet 2019 devant le jury composé de :*

- BENMAMMAR Badr (Président)
- LEHSAINI Mohamed (Encadrant)
- BENMAHDI Meriem Bouchra (Co-Encadrante)
- BENMOUNA Youcef (Examineur)

Année universitaire : 2018-2019

## *Remerciements*

*Merci ALLAH d'avoir nous donner la chance pour accomplir ce projet de fin d'étude.*

*Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères a notre encadreur Mr LEHSAINI d'avoir accepté de nous encadré, nous lui remercions pour sa confiance, sa disponibilité, sa patience et surtout ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

*Merci Mr parce que vous avez cru en nous.*

*Nous tenons à remercier également notre co-encadreur Mm BENMAHDI Bouchra pour ses efforts, ses connaissances et ses expériences personnelles qu'elle a partagé avec nous, ils ont été d'un grand soutien dans la réalisation de ce mémoire.*

*Nous désirons aussi remercier Mr BENMAMMAR pour l'honneur qu'il nous fait de présider notre jury de soutenance.*

*Nos chaleureux remerciements vont également à Mr BENMOUNA d'avoir participer à examiner et témoigner notre modeste travail.*

*Nous remercions vivement tous nos enseignants pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.*

*Nous voudrions surtout remercier nos parents, frères et sœurs, pour leurs encouragements et de nous avoir donné la force pour avancer durant cette période.*

*Et enfin, nous aimerions remercier nos amis et collègues pour leurs présences, leurs soutiens inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.*

*C'est petits quelques mots ne pourrons jamais exprimer la reconnaissance que nous apportons vers tous ceux qui ont été là pour nous durant la réalisation de ce mémoire, MERCI A TOUS...*

## *Dédicace Ahlem*

*Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,*

### *A MA CHÈRE MÈRE*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance, Je t'offre aujourd'hui ce travail pour confirmer toute l'importance que tu revêts à mes yeux, la place unique que tu occupes dans ma vie, en ta qualité de mère et d'amie.*

### *A LA MEMOIRE DE MON PÈRE*

*Ce travail est dédié à mon père, décédé trop tôt, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Repose en paix mon papa généreux.*

### *A ma chère belle-mère et belle grand-mère*

*Vous m'avez accueilli à bras ouverts dans votre famille. En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

### *A mon mari Mohamed*

*Tes sacrifices, ton soutien moral et matériel, ta gentillesse sans égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études. Sans ton aide, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour.*

*A mes frères et mes belles sœurs.*

*A mes tantes, mes oncles.*

*A mes chers cousins et cousines.*

*A tous mes amis d'enfance, mes collègues, mes camarades de la promotion à l'université de Tlemcen.*

## *Dédicace Bouchra*

*Je dédie ce mémoire*

*A ALLAH tout puissant, qui m'a donné la chance d'avoir réalisé ce mémoire.*

*A mes très chers parents qui ont été toujours présents pour moi, qui m'ont encouragé pour surmonter tous les obstacles, qui ont su me supporté dans mes états les plus pires, qui m'ont supporté financièrement durant toutes ces années d'études.*

*A mes mamies "Ained Tabet Zahia" et "Cheikh Leila" pour leur amour, douceur et tendresse.*

*A mon future mari "Mohammed" pour son soutien et ses encouragements.*

*A mes frères "Yassine" et "Karam".*

*A mes douces petites sœurs "Radja" et "Wisseem".*

*A mes oncles et tantes pour leur encouragement, leur conseil et leur aide.*

*A mes meilleurs amis Sihem, Zokha, Ahmed et Reda, pour leur présence, leur encouragement et surtout leur soutien moral.*

*A mon encadreur "Mr LEHSAINT".*

*A mon co-encadreur Mm Benmahdi Bouchra que je la considère comme une amie chère à moi, merci pour vos efforts, pour votre aide, pour vos conseils, merci pour tout...*

*A mon binôme et ma meilleure amie "BENDIMERED Ahlem" avec qui j'ai partagé ces cinq dernières années d'études et avec qui j'ai eu l'honneur de les finir.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux que j'aime.*

*A tous ceux qui m'aiment.*

## Résumé

L'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans plusieurs domaines a poussé les chercheurs à proposer des protocoles de routage économes en énergie pour garantir une longue longévité des réseaux vu que ces derniers sont considérés comme des réseaux présentant une certaine autonomie en termes d'énergie.

Dans ce travail, nous avons proposé un nouveau schéma de routage basé sur l'approche de clustering. Ce protocole permet d'organiser le réseau en clusters en tenant compte de la distance entre les nœuds et utilise un schéma de routage basé sur une approche gloutonne améliorée (Greedy Forwarding) pour acheminer les données d'un nœud source à la station de base. Ce schéma de routage permet d'établir des chemins de clusterhead à clusterhead (CH-to-CH) jusqu'à l'aboutissement à la station de base ce qui réduit la consommation d'énergie et par conséquent augmente la durée de vie du réseau.

**Mots Clés :** Clustering, Greedy Forwarding, K-means, Réseaux de capteurs, Routage

## Abstract

The use of wireless sensor networks in several areas has prompted researchers to propose energy-efficient routing protocols to ensure long network lifetime as the networks are considered energy-autonomy networks.

In this work, we proposed a new routing scheme based on the clustering approach. This protocol organizes the network into clusters by considering the distance between the nodes and uses a routing scheme based on an improved greedy approach (Greedy Forwarding) to route data from a source node to the base station. This routing scheme establishes paths from clusterhead to clusterhead (CH-to-CH) until the base station, which reduces energy consumption and therefore increases network lifetime.

**Keywords:** Clustering, Greedy Forwarding, K-means, Wireless Sensor Networks, Routing.

## ملخص

دفع استخدام شبكات الاستشعار اللاسلكية في العديد من المناطق الباحثين إلى اقتراح بروتوكولات توجيه موفرة للطاقة لضمان عمر افتراضي طويل للشبكة لأن الشبكات تعتبر شبكات مستقلة للطاقة. في هذا العمل ، اقترحنا خطة توجيه جديدة تستند إلى نهج التجميع. ينظم هذا البروتوكول الشبكة في مجموعات عن طريق النظر في المسافة بين العقد ويستخدم نظام توجيه يستند إلى نهج الجشع المحسن (توجيه الجشع) لتوجيه البيانات من عقدة مصدر إلى المحطة الأساسية. يحدد نظام التوجيه هذا مسارات من الكتلة إلى رأس الكتلة (CH-to-CH) حتى المحطة الأساسية ، مما يقلل من استهلاك الطاقة وبالتالي يزيد من عمر الشبكة.

**الكلمات المفتاحية:** التجميع، Greedy Forwarding، K-means، شبكات الاستشعار اللاسلكية، التوجيه

# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>i</b>
<b>Dédicace</b> .....	<b>ii</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iv</b>
<b>ملخص</b> .....	<b>iv</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>v</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>ix</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>x</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>xi</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Les Réseaux de Capteurs : Généralités et Concepts</b> .....	<b>2</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Notion de capteur .....	3
I.2.1 Définition.....	3
I.2.2 Capteur intelligent .....	4
I.2.3 Architecture d'un capteur .....	4
I.2.3.1 Architecture matérielle (Figure I.2) .....	4
I.2.3.2 Architecture logicielle.....	5
I.2.4. Zone de couverture .....	5
I.3 Réseaux de capteurs sans fil (RCSFs).....	5
I.3.1 Présentation d'un RCSF .....	5
I.3.2 Caractéristiques des RCSFs.....	6
I.3.3 Classification des applications des RCSF .....	7

I.3.3.1 Applications orientées temps .....	7
I.3.3.2 Applications orientées événements .....	8
I.3.3.3 Applications orientées requêtes .....	8
I.3.3.4 Applications hybrides .....	9
I.3.4 Domaines d'applications des RCSFs.....	9
I.3.5 Architecture des RCSFs.....	10
I.3.5.1 RCSFs plats.....	10
I.3.5.2 RCSF hiérarchique "hierarchical" .....	11
I.3.6 Défis des RCSFs .....	11
I.5. Conclusion.....	13
<b>Chapitre II : Protocol de Routage pour les RCSFs.....</b>	<b>14</b>
II.1 Introduction.....	15
II.2 Protocoles de routage .....	15
II.2.1 Définition du routage .....	15
II.2.2 Les différents types de routage.....	15
II.2.2.1 Le routage à plat .....	15
II.2.2.2 Le routage basé sur la localisation.....	17
II.2.2.3 Le routage hiérarchique .....	17
II.3. D'autres travaux antérieurs .....	19
II.4 Clustering et partitionnement de données.....	20
II.4.1 Définition .....	20
II.4.2 Clustering basé sur une représentation non supervisée .....	20
II.4.2.1 L'approche K-Means .....	20
II.4.2.2 K-médianes .....	21
II.4.2.3 K-modes.....	21
II.4.3 Méthodes de clustering.....	22

II.4.3.1 Les méthodes hiérarchiques.....	22
II.4.3.2 Les méthodes de partitionnement .....	22
II.4.3.3 Les méthodes basées sur la densité.....	22
II.4.3.4 Les méthodes basées sur la grille.....	23
II.4.4 Domaines d'applications du clustering .....	23
II.4.5 Types de transmission dans le routage .....	23
II.4.6 Greedy forwarding .....	24
II.4. Conclusion .....	24
<b>Chapitre 3 : Schéma de routage basé sur le clustering pour les RCSFs .....</b>	<b>25</b>
III.1 Introduction .....	26
III.2 K-means.....	26
III.3. La méthode silhouette [36].....	27
III.4. La méthode de k-means distribuée dans les réseaux de capteurs .....	28
III.5. Le principe du schéma de routage proposé.....	28
III.5.1. Les avantages .....	28
III.5.2. Les inconvénients.....	29
III.5.3. Le Schéma de routage proposé .....	29
III.6 Description du déroulement du protocole.....	32
III.7 Simulation et analyse des performances.....	35
III.7.1 L'environnement d'implémentation .....	35
III.7.1.1 Modèle Energétique .....	35
III.7.1.2 Déploiement des nœuds capteurs .....	36
III.7.1.3 Nombre de clusters.....	36
III.8. Evaluation et comparaison des résultats .....	37
III.8.1 Durée vie de réseau.....	38
III.8.2 La consommation d'énergie.....	38



III.8.3 Nombre de paquets envoyés à la station de base .....	39
III.9 Conclusion .....	40
<b>Conclusion général .....</b>	<b>42</b>
<b>Références .....</b>	<b>43</b>

# Liste des figures

## Chapitre I : Les Réseaux de Capteurs : Généralités et Concepts

<b>Figure I.1</b> Schéma d'un nœud capteur .....	3
<b>Figure I.2</b> Unité d'alimentation d'un capteur .....	4
<b>Figure I.3</b> Zone de couverture d'un capteur .....	5
<b>Figure I.4</b> Surveillance des barrages .....	8
<b>Figure I.5</b> Application orientée requête.....	8
<b>Figure I.6</b> Capteurs de santé.....	9
<b>Figure I.7</b> Capteurs de transport.....	10
<b>Figure I.8</b> Capteurs domotique.....	10
<b>Figure I.9</b> Architecture plate d'un RCSF .....	11
<b>Figure I.10</b> Architecture hiérarchique d'un RCSF .....	11

## Chapitre II : Protocoles de routage pour les RCSFs

<b>Figure II.1:</b> Protocole SPIN .....	16
<b>Figure II. 2:</b> Greedy Forwarding basée sur la distance .....	24

## Chapitre III : Schéma de routage basé sur le clustering pour les RCSFs.....31

<b>Figure III.1</b> Nombre de nœuds vivants en fonction du nombre de rounds .....	30
<b>Figure III.2</b> Consommation d'énergie .....	31
<b>Figure III.3</b> Nombre de paquets envoyés à la station de base.....	31
<b>Figure III.4</b> Schéma de création des clusters .....	33
<b>Figure III.5</b> Processus d'élection des cluster-heads.....	33
<b>Figure III.6</b> Schéma de construction des chemins .....	34
<b>Figure III.7</b> Schéma de transmission des données.....	34
<b>Figure III.8</b> Déploiement aléatoire de 500 nœuds capteurs .....	36
<b>Figure III.9</b> Formation des clusters avec le protocole proposé.....	37

<b>Figure III.10</b> Formation des clusters (K-means).....	37
<b>Figure III.11</b> Nombre de nœuds vivants vs. Nombre des rounds .....	38
<b>Figure III.12</b> Consommation d'énergie .....	39
<b>Figure III.13</b> Nombre de paquets envoyés à la station de base.....	39

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1</b> : Les paramètres de la simulation .....	35
--------------------------------------------------------------	----

# Liste des abréviations

ADC : Analog to Digital Converter

CH : Cluster Head

Couche MAC : Media Access Control

DD : Directed Diffusion

GPS : Global Positioning System

HEED : Hybrid, Energy-Efficient, Distributed approach

LEACH : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

MEMS : Micro Electro Mechanical Systems

Modele OSI : Open Systems Interconnection

NS-2 : Network Simulator

PEGASIS : Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems

QoS : Quality of Service

RCSF : Réseau de Capteurs Sans Fil

RSSI : Received Signal Strength Indication

SPIN : Sensor Protocol for Information via Negotiation

TCP/IP : Transfer Control Protocol/Internet Protocol



---

# INTRODUCTION GENERALE

---



# Introduction générale

Ces dernières années, les progrès dans le domaine de la technologie des systèmes micro-électromécaniques (MEMS) et le domaine des communications sans fil ont permis l'apparition de nouveaux équipements électronique dotés de moyens de communication sans fil, peu coûteux et peuvent être configurés pour former un réseau autonome. Ces réseaux sont les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF).

Les réseaux de capteurs se composent d'un ensemble de capteurs capables de communiquer entre eux et de fournir des informations par la combinaison des mesures prises par les différents capteurs. Ces RCSFs sont utilisés dans plusieurs domaines tels que : le domaine militaire, médical, industriel, transport, et ils sont utilisés aussi dans les applications de surveillance de l'environnement (monitoring)...etc.

Parmi les défis essentiels des réseaux de capteurs sans fil nous pouvons citer : le maintien des mêmes performances lors du passage à l'échelle, la consommation d'énergie et surtout la durée de vie puisque les capteurs sont généralement dotés de batteries non rechargeables et leur remplacement est quasiment impossible quand ils sont déployés dans des zones hostiles. A cet effet, dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous proposons une nouvelle approche de routage qui permet de relever ces défis. Cette approche proposée est basée sur le clustering pour organiser le réseau et un schéma de routage multi-sauts (CH-to-CH) selon un algorithme glouton amélioré (Greedy Forwarding) pour acheminer les données à la station de base. Ceci est dans le but de minimiser la consommation d'énergie et par conséquent augmenter la durée de vie du réseau.

Ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités et des informations de base sur les réseaux de capteurs sans fil.
- Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté quelques protocoles de routage qui ont fournis de bonnes performances pour les RCSFs.
- Le troisième chapitre détaille notre solution de routage proposée, évalue ses performances et les compare à d'autres protocoles décrits dans la littérature.

Et enfin, nous terminons par une conclusion générale qui récapitule le travail réalisé dans notre projet de fin d'études et quelques perspectives.



---

# CHAPITRE I

## Les Réseaux de Capteurs : Généralités et Concepts

---



# Chapitre I :

## Les réseaux de capteurs : généralités et concepts

### I.1 Introduction

Les progrès dans le domaine de l'électronique miniaturisée et les communications sans fil ont donné naissance à des composants peu coûteux capables de prélever des grandeurs environnementales. Ces composants sont appelés des nœuds capteurs qui ont la capacité de s'auto-organiser pour former un réseau de capteurs sans fil (RCSF).

Dans ce chapitre, nous présentons les RCSFs, en commençant par définir les nœuds capteurs et leurs architectures ensuite nous définissons les RCSFs ainsi que leurs caractéristiques, puis leurs domaines d'application, nous citons par la suite les principaux défis rencontrés par les RCSFs et nous terminons ce chapitre par une petite conclusion.

### I.2 Notion de capteur

#### I.2.1 Définition

Un nœud capteur appelé "Sensor node" en anglais est un petit appareil autonome qui se compose de plusieurs capteurs dont chacun d'entre eux est capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement immédiat comme la température, la vibration, la pression. Un nœud capteur est un dispositif capable de transformer l'état d'une grandeur physique et/ou logique observée en une grandeur utilisable. Généralement, on obtient une grandeur de sortie présentée sous forme d'un signal électrique qui peut être soit une charge, une tension, un courant[1].



Figure I.1 Schéma d'un nœud capteur



## I.2.2 Capteur intelligent

Un capteur intelligent est un équipement qui intègre des fonctionnalités supplémentaires ou évoluées aptes à améliorer ce pourquoi il a été conçu. Il peut avoir comme but de modifier le comportement interne du capteur pour optimiser sa capacité à collecter les données [2], ou simplement pour effectuer localement des traitements et des calculs [3].

## I.2.3 Architecture d'un capteur

Un capteur est constitué de :

### I.2.3.1 Architecture matérielle (Figure I.2)

**a. L'unité d'acquisition (sensing unit) :** est généralement composée de deux sous-unités : les capteurs et les convertisseurs analogique-numérique ADCs<sup>1</sup>. Les capteurs obtiennent des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques [4].

**b. L'unité de traitement (Processing unit):** est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de transmission. Elle contrôle les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition, et stocke les données collectées [4].

**c. L'unité de transmission (Transceiver unit) :** est responsable de toutes les émissions et réceptions des données via un support de communication radio. qui relie le nœud au réseau [4].

**d. l'unité d'alimentation ou batterie (power unit) :** Il s'agit généralement d'une batterie. Cette batterie est responsable à la gestion de l'énergie et de l'alimentation de tous les composants du capteur. Ce qui rend l'énergie comme principale contrainte pour un capteur [4].

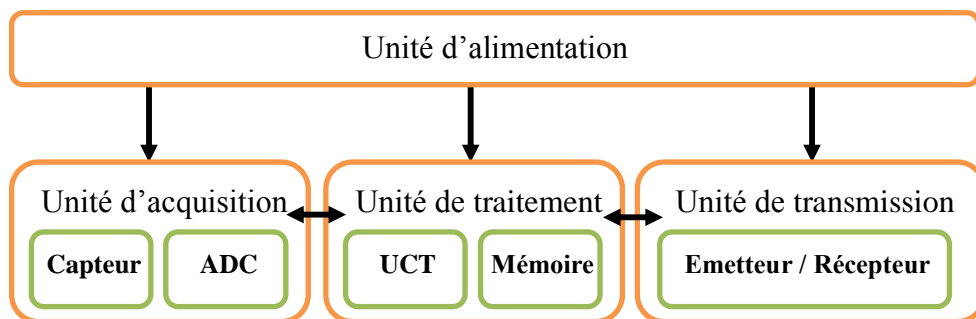


Figure I.2 Unité d'alimentation d'un capteur

---

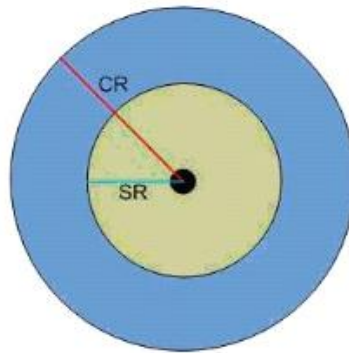
<sup>1</sup>ADCs: Analog-to-Digital Converter

### I.2.3.2 Architecture logicielle

La contrainte énergétique des capteurs exige l'utilisation de systèmes d'exploitation légers tels que TinyOS ou Contiki. Cependant, TinyOS reste toujours le plus utilisé et le plus populaire dans le domaine des RCSFs. Il est libre et est utilisé par une large communauté scientifique dans des simulations pour le développement et le test des algorithmes et des protocoles [4].

### I.2.4. Zone de couverture

Les capteurs fonctionnent avec un modèle à seuil. Il possède deux zones : une zone de perception (SR) et une zone de communication (CR). Pour schématiser, on considère que ces zones sont représentées par deux cercles qui ont pour centre le capteur (Figure I.3).



**Figure I.3** Zone de couverture d'un capteur

En influant sur le rapport entre le rayon du SR et le rayon du CR, nous pouvons modifier les contraintes. Ainsi, nous pouvons minimiser le nombre de nœuds actifs et maximiser la durée de vie du réseau. Comme les capteurs sont généralement déployés dans une zone d'intérêt de façon aléatoire, il est nécessaire de disposer d'une densité importante de capteurs. Mais si la densité de capteurs est trop importante et que la zone que nous voulons surveiller est "trop" couverte, alors des capteurs vont fonctionner inutilement[5].

## I.3 Réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

### I.3.1 Présentation d'un RCSF

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF ou WSN : Wireless Sensor Network en anglais) est un système distribué mettant en communication un grand nombre d'entités autonomes appelées "capteurs sans fil", ou simplement "capteurs". C'est un ensemble de nœuds capteurs intelligents de petite taille, à faible coût et de puissance limitée, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers (appelés aussi nano ordinateurs). Les capteurs communiquent par radio sans fil afin d'acheminer l'information à une ou plusieurs stations de base.

Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée. Les nœuds sont équipés d'une batterie qui est une source d'énergie non durable et que son remplacement est difficile voire impossible surtout dans des endroits hostiles [1, 6].

### I.3.2 Caractéristiques des RCSFs

La conception des réseaux de capteurs est influencée par de nombreux facteurs qui représentent la base de la conception de protocoles ou d'algorithmes pour les réseaux de capteurs. Il existe plusieurs caractéristiques qui distinguent les RCSFs des autres réseaux sans fil dont nous citons les plus importantes [7, 8] :

- **Durée de vie du réseau** : C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise ou le dernier nœud ou un pourcentage de nœuds. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.
- **Bande passante limitée** : Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.
- **Média du transport** : Dans un réseau de capteurs, la communication multi-sauts entre les nœuds est réalisée avec des liens sans fil à l'aide de media optique, infrarouge ou radio. La plus part des réseaux de capteurs utilisent des circuits de communication à radio fréquence grâce à leur faible coût ainsi que leur facilité d'installation [6].
- **La topologie du réseau** : Elle est en constante évolution à cause du changement de l'état d'activité des capteurs (actif, mise en veille et passif). Il faut que les capteurs soient capables d'adapter leur fonctionnement afin de maintenir la topologie souhaitée et assurer la couverture totale de la zone de déploiement.
- **Déploiement** : Les capteurs sont soit déployés manuellement quand leur nombre est petit soit de manière aléatoire lancés en masse depuis un avion, par exemple.
- **Le passage à l'échelle** : La plupart des protocoles sont conçus pour des réseaux de capteurs de taille moyenne. Cependant, ces protocoles sont dits efficaces si les performances des réseaux ne doivent pas chuter d'une manière drastique quand le nombre de capteurs augmente dans le réseau.
- **La consommation d'énergie** : L'économie d'énergie est l'une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner pour une durée maximale.
- **L'auto-configuration** : Les capteurs sont généralement déployés aléatoirement dans des zones d'intérêt hostiles et en grand nombre.

- Par conséquent, aucune intervention humaine ne peut être requise pour assurer leur organisation. L'auto-configuration de ces réseaux s'avère nécessaire pour leur bon fonctionnement.
- **La qualité de service** : cette caractéristique est visée dans les réseaux de capteurs afin d'assurer la fiabilité de livraison des paquets entre les nœuds sources et réduire le délai de réception de ces paquets. Les protocoles doivent vérifier la stabilité du réseau ainsi que les données redondantes transmises dans le réseau selon la répartition du trafic [7].
- **Le mode de transmission** : Il joue un rôle important dans les réseaux de capteurs. Les nœuds peuvent transmettre des données vers d'autres nœuds dans le réseau en utilisant une seule fréquence ou bien plusieurs fréquences.
- **Les nœuds de détection** : Ils peuvent être mobiles ou statiques, selon l'application.
- **La scalabilité** : Contrairement aux réseaux sans fil traditionnels (personnel, local ou étendu), un RCSF peut contenir un très grand nombre de nœuds capteurs (des centaines, des milliers...) [9]. Un réseau de capteur est scalable parce qu'il a la faculté d'accepter un très grand nombre de nœuds qui collaborent ensemble afin d'atteindre un objectif commun.
- **La tolérance aux pannes** : Dans le cas de dysfonctionnement d'un nœud à cause de l'épuisement de son énergie par exemple, ou aussi en cas d'ajout de nouveaux nœuds capteurs dans le réseau, ce nœud doit continuer à fonctionner normalement sans interruption [9]. Ceci explique le fait qu'un RCSF n'adopte pas de topologie fixe mais plutôt dynamique.
- **Une densité importante des nœuds** : Les RCSFs sont caractérisés par leur forte densité [10]. Cette densité peut atteindre, selon le type d'application, 20 nœuds/m<sup>3</sup>[9] surtout lorsqu'il s'agit de capteurs associés à des petits objets connectés.
- **Une collaboration entre les nœuds** : Les contraintes strictes de consommation d'énergie mènent les nœuds capteurs à détecter et traiter les données d'une manière coopérative afin d'éviter le traitement redondant d'une même donnée observée, et qui aura un impact négatif sur la perte d'énergie [10].

### I.3.3 Classification des applications des RCSF

Les applications des réseaux de capteurs sans fil peuvent être classées en quatre types d'applications : orientées temps (time-driven), orientées événements (event-driven), orientées requêtes (query-driven) et hybrides [11].

#### I.3.3.1 Applications orientées temps

Cette classe représente les applications où l'acquisition et la transmission des données capturées sont liées au temps : instant précis, période d'acquisition. Cette période d'acquisition peut être plus ou moins longue selon l'application (de quelques secondes jusqu'à quelques heures voire des jours). Ainsi, la quantité de données échangée dans le réseau dépend de la périodicité des mesures à effectuer sur l'environnement [7].

### I.3.3.2 Applications orientées événements

Dans ce type d'applications, les capteurs envoient les données à la station de base seulement si un évènement spécial se produit. Nous pouvons citer l'exemple de surveillance des feux dans les forêts où un capteur envoie des alarmes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil. Ce type d'application nous le retrouvons dans différents domaines tels que la surveillance médicale (surveillance de taux de glycémie dans le sang), le contrôle d'édifice comme montre la figure I.4, la surveillance militaire, etc[12].

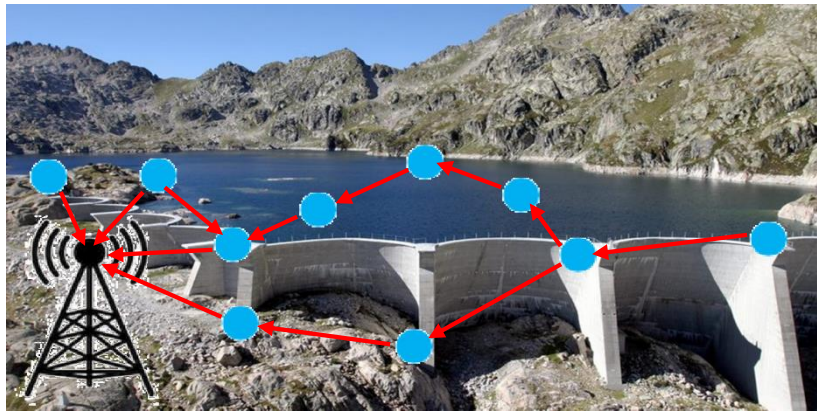


Figure I.4 Surveillance des barrages

### I.3.3.3 Applications orientées requêtes

Dans ce cas, un capteur envoie de l'information uniquement suite à une demande explicite de la station de base. Cette classe d'applications est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur. Ce dernier peut requérir des informations à partir de certaines régions dans le réseau ou interroger les capteurs pour acquérir des mesures bien particulières. Dans ce cas, des connaissances sur la topologie du réseau et l'emplacement des capteurs sont nécessaires[7].

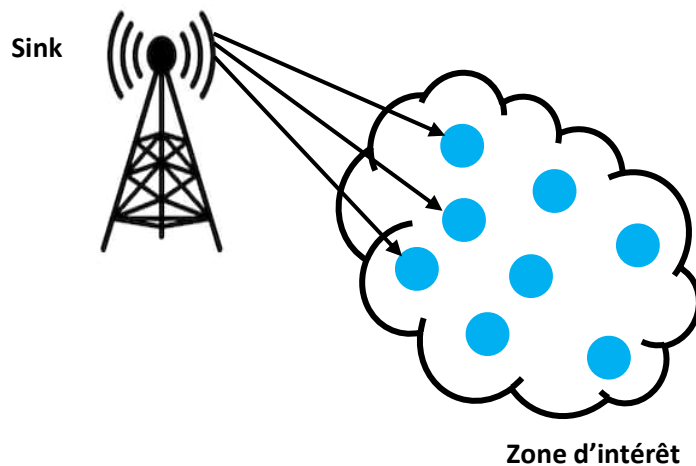


Figure I.5 Application orientée requête

### I.3.3.4 Applications hybrides

Ce type d'applications met en œuvre les trois modes de fonctionnement décrits précédemment. Par exemple, dans un réseau conçu pour le suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau de surveillance (time-driven) et un réseau de collecte de données par événements (event-driven) [7].

### I.3.4 Domaines d'applications des RCSFs

Le réseau de capteurs sans fil est l'une des technologies qui ont bouleversé le monde et notre manière de vivre et de travailler.

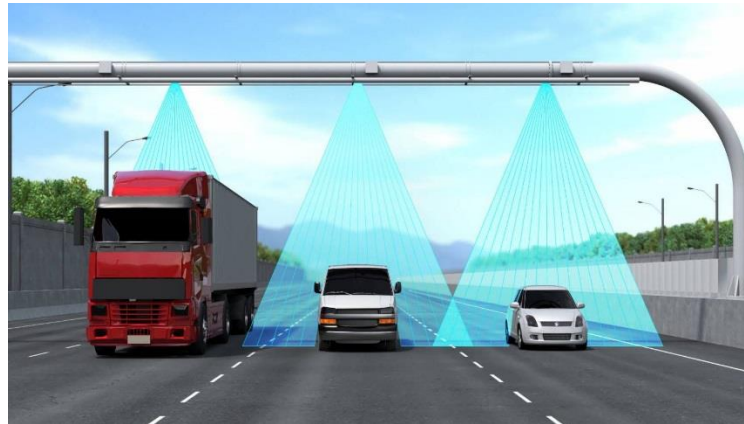
L'émergence de ces réseaux répondaux besoins accrus de l'observation, de la diffusion automatique et de contrôle des phénomènes physiques et biologiques complexes, dans différents domaines [13-15]:

- Industriel, technique et scientifique (monitoring de la température, la pression, l'hygrométrie, la luminosité, contrôle qualité d'une chaîne de fabrication, etc.),
- Ecologie et environnement (surveillance de la radioactivité, de polluants tels que les HAP, les métaux lourds, ou de l'ozone ou du NO<sub>2</sub>, du risque sismique ou d'explosion d'un volcan, ou encore le suivi étendu d'émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre).
- Santé (suivi des patients à distance, capteurs sur le corps humain, veille éco-épidémiologique et épidémiologique).



**Figure I.6** Capteurs de santé

- Transports : contrôle du trafic routier, urbain, ferroviaire, portuaire, etc., prévention des accidents, optimisations diverses.



**Figure I.7** Capteurs de transport

- L'automatisation des bâtiments et domotique.



**Figure I.8** Capteurs domotique

- Gestion d'hôpitaux, etc.
- Sécurité (ex : détection et surveillance d'incendies de forêts, d'avalanches, d'ouragans, de risque de défaillance d'équipement de grande envergure (ex barrage, réseau de digue, réseau routier en cas de tremblement de terre, etc.).
- Usage militaire : déploiement des capteurs pour protéger des terrains militaires ou la périphérie des navires de guerre.

### I.3.5 Architecture des RCSFs

#### I.3.5.1 RCSFs plats

Un RCSF plat est un réseau homogène, où tous les nœuds sont identiques disposant des mêmes capacités dans la communication et dans le captage d'informations et une station de base différente puisque elle joue le rôle de passerelle chargée de transmettre les informations collectées au centre de contrôle[16]. La figure I.13 illustre l'architecture plate d'un RCSF.

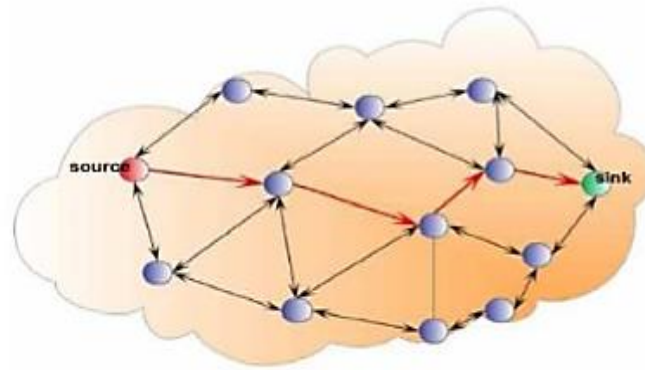


Figure I.9 Architecture plate d'un RCSF

### I.3.5.2 RCSF hiérarchique "hierarchical"

C'est un réseau hétérogène où les nœuds peuvent disposer d'une source énergétique, d'une portée de communication ou d'une puissance de calcul différente les uns des autres [16].

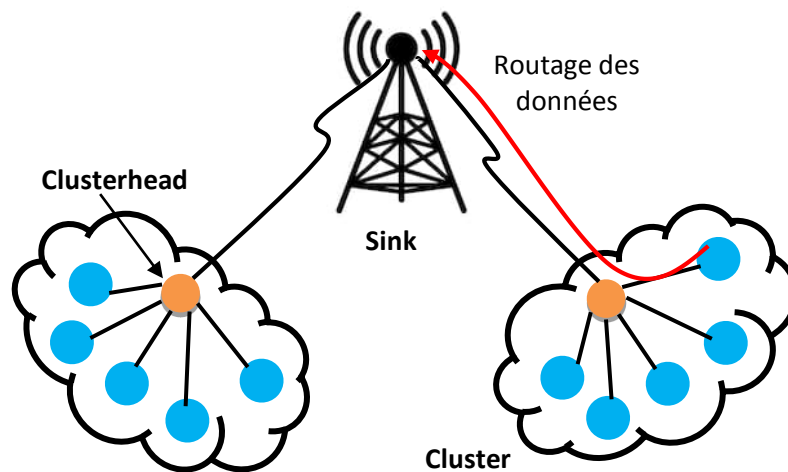


Figure I.10 Architecture hiérarchique d'un RCSF

### I.3.6 Défis des RCSFs

L'évolution du nombre d'applications dans les RCSFs a donné naissance à des nouvelles problématiques qui nécessitent d'être résolues sur le plan recherche et pratique. Ces problématiques concernent plusieurs aspects. En effet, il n'y a aucun standard spécifique aux RCSFs, les problèmes de communications, de traitement des données et de la gestion du capteur lui-même, sont partiellement identifiés et les solutions apportées sont souvent spécifiques à un cas précis. Les principaux défis lancés par la communauté des chercheurs se rapportent essentiellement aux problèmes de: la découverte du réseau, le routage, la couverture, la durée de vie, la sécurité, etc...



Par ailleurs, les caractéristiques intrinsèques des RCSFs, telles que la capacité limitée des batteries, les moyens limités de calcul et de traitement des données, diffèrent de celles d'un réseau TCP/IP traditionnel et des réseaux ad hoc en général[17].

Les axes de recherches dans les RCSFs sont passés des problèmes liés au routage des données et leur sécurité aux problèmes beaucoup plus pointus concernant la durée de vie des RCSFs, améliorer leur qualité de service, augmenter leur tolérance aux pannes. D'où l'apparition des travaux sur les réseaux de capteurs dans des domaines très spécialisés et qui traitent des problématiques qui n'ont pas été abordé auparavant comme l'utilisation de la redondance pour augmenter la durée de vie de ces réseaux en mettant en veille les capteurs à tour de rôle suivant des politiques et des algorithmes d'ordonnancement d'activités. On peut classer les travaux de recherche dans le domaine des réseaux de capteurs comme suit :

- **Conception des capteurs** : Trouver de nouvelles conceptions adéquates et spécifiques pour des environnements donnés (détecteur de chute, vêtement intelligents, capteurs multimédias, ...).
- **Protocoles de communication** : Trouver de nouvelles paradigmes et protocoles de communication qui prennent en compte l'évitement de collisions, les vides, les flux multimédias, le routage des données .....
- **Passage à l'échelle** : Afin de garantir le bon fonctionnement du réseau, les nouveaux schémas de déploiement doivent être capables de travailler avec un grand nombre de nœuds. Par ailleurs, ils doivent utiliser la propriété de haute densité dans les réseaux de capteurs, et donc pouvoir déployer un grand nombre de nœuds dans une petite surface surtout avec l'avènement de l'internet des objets où le nombre de capteurs pourra atteindre plus de  $10 \text{ capteurs}/m^2$ .
- **Préservation de l'énergie et optimisation** : Trouver de nouvelles visions d'optimisations.
- **Sécurité** : Dans les applications sensibles la sécurisation des données est nécessaire. D'où, il faudrait tenir compte des ressources limitées des capteurs pour proposer des solutions légères en termes de calcul et de stockage.
- **Conception de middleware** : Nouvelles plateforme dédiées aux RCSFs.

Selon les couches du modèle OSI, les défis actuels dans les réseaux de capteurs se résument dans le niveau matériel à la miniaturisation (nano-capteur). Dans la couche physique, la fiabilité d'acquisition doit être augmentée, dans la couche MAC au développement des nouveaux protocoles qui augmente la QoS. Au niveau routage au développement de nouveaux aspects de routage avec équilibrage de charge pour augmenter la durée de vie, au niveau transport de trouver de nouveau mécanisme de contrôle de flux plus efficaces quant au niveau application c'est principalement liés au développement de logiciels et applications de traitement des données qui garantissent l'organisation et la pertinence de l'information extraite des données fusionnées.

## **I.5. Conclusion**

A travers ce chapitre, nous avons essayé de présenter les réseaux de capteurs sans fil, nous avons posé les briques de base sur les concepts généraux qui aident à la compréhension des réseaux de capteurs.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les différents protocoles de routage conçus pour les RCSFs, nous définissons le clustering et ses méthodes ainsi que les outils matériels et logiciels qui permettent la mise en place de certains protocoles pour les RCSFs.



---

## CHAPITRE II

# Protocoles de routage pour les RCSFs

---



# Chapitre II :

## Protocoles de routage pour les RCSFs

### II.1 Introduction

La réalisation d'un réseau de capteurs sans fil nécessite des outils logiciels et matériels précise pour son fonctionnement.

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents protocoles de routage et quelques méthodes de clustering qui est une méthode utilisée pour organiser les nœuds du réseau en clusters. Nous notons que l'approche de clustering permet le passage à l'échelle et d'améliorer la durée de vie des réseaux.

### II.2 Protocoles de routage

#### II.2.1 Définition du routage

Le routage consiste à trouver le meilleur chemin pour envoyer le message de la source à la destination. Dans le cadre des RCSFs, il doit être efficace en termes d'énergie puisque les nœuds dans ce type de réseaux sont généralement dotés de batteries dont la durée de vie est limitée. Pour cela, il faut bien sûr être capable de trouver un chemin qui ne consomme pas trop d'énergie (économe en énergie), et qui ne soit pas trop long également[18]. Toute conception de protocole de routage doit prendre en considération les contraintes suivantes :

1. La minimisation de la charge du réseau.
2. Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multipoints fiables.
3. Assurer un routage presque optimal.
4. Offrir une bonne qualité de service en termes de latence et permettre la tolérance aux pannes pour garantir l'acheminement des données quand certains nœuds cessent de fonctionner.

#### II.2.2 Les différents types de routage

Les protocoles de routage sont en fait découpés en quatre familles : les protocoles de routage à plat, hiérarchiques, non hiérarchiques, et géographiques.

##### II.2.2.1 Le routage à plat

Le routage à plat et données centrales, est le modèle le plus simple où chaque nœud dans le réseau transmet les données à la station de base. Chaque nœud joue typiquement le même rôle et les nœuds capteurs collaborent entre eux pour accomplir la même tâche.

La station de base envoie des requêtes à certaines régions et se met en attente des données des capteurs situés dans les régions choisies. Nous présentons dans ce qui suit quelques protocoles qui sont fondés sur cette architecture :

### a) SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation)

SPIN utilise trois types de messages, ADV, REQ et DATA. Le message ADV est diffusé par un nœud qui possède des données et compte les envoyer. Ce message indique le type de données à envoyer par le nœud source. Les nœuds concernés qui ont reçu le message ADV envoient un message REQ demandant les données. Le nœud ayant les données envoie les données aux nœuds concernés. Après la réception des données, les nœuds envoient un message ADV et le processus se poursuit. Ceci peut être vu dans la figure ci-dessous.

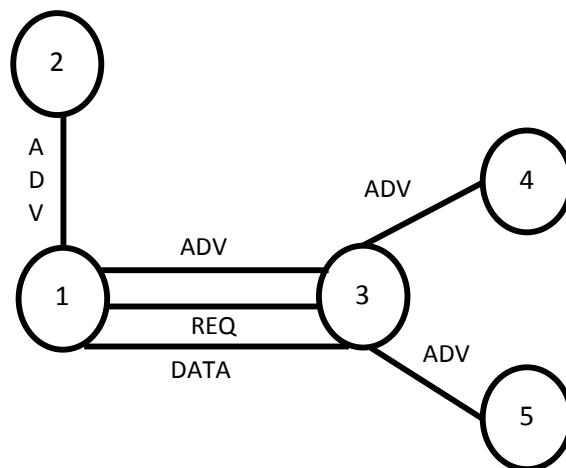


Figure II.1: Protocole SPIN

Le nœud 1 envoie un message ADV à tous ses voisins, 2 et 3. Le nœud 3 demande les données à l'aide du message REQ, pour lequel le nœud 1 envoie les données à l'aide du message DATA au nœud 3. Après avoir reçu les données, le nœud 3 envoie le message ADV à ses voisins 4 et 5 et le processus continue. Il n'envoie pas à 1 car 3 sait qu'il a reçu des données de 1.

Les données sont décrites dans le paquet ADV à l'aide de descripteurs de données de haut niveau, qui permettent d'identifier les données. Ces descripteurs de données de haut niveau sont appelés métadonnées. Les méta-données de deux données différentes doivent être différentes et les méta-données de deux données similaires doivent être similaires. L'utilisation de métadonnées évite que les données réelles ne soient inondées via le réseau. Les données réelles ne peuvent être transmises qu'aux nœuds qui en ont besoin. Ce protocole rend également les nœuds plus intelligents, chaque nœud aura un gestionnaire de ressources, qui informera chaque nœud de la quantité de ressources restantes dans le nœud. En conséquence, le nœud peut décider s'il peut ou non être un nœud de transfert.

### b) Protocole DD (Directed Diffusion)

Dans la diffusion dirigée, les nœuds sont identifiés par leurs extrémités, et la communication inter-nœud se superpose à un service de livraison de bout en bout fourni dans le réseau.

En diffusion dirigée, les nœuds du réseau sont sensibles aux applications, car nous permettons à un code spécifique à une application de s'exécuter sur le réseau et aidons la diffusion dans le traitement des messages. Cela permet à la diffusion dirigée de mettre en cache et de traiter les données sur le réseau (agrégation), en diminuant la quantité de trafic de bout en bout et d'entraîner des économies d'énergie plus importantes.

La diffusion dirigée [19] est un protocole basé sur une requête dans lequel une requête est inondée dans le réseau par le récepteur où plusieurs chemins sont établis entre le nœud destinataire et la source. Le nœud destinataire renforce l'un des chemins et reçoit les données dans un intervalle plus court via ce chemin renforcé. Les auteurs de [19] ont modifié le modèle d'énergie radioélectrique du simulateur NS-2, conçu à l'origine pour la radio 802.11, afin d'analyser la consommation d'énergie du réseau de capteurs à l'aide du protocole de diffusion dirigée. Il est montré que la diffusion dirigée pourrait économiser de l'énergie en choisissant le bon chemin c'est-à-dire le chemin économe en énergie. Néanmoins, la diffusion dirigée ne peut pas être appliquée aux applications nécessitant une transmission constante des données telles que les applications de surveillance. Le routage sensible à l'énergie [20] soutient que l'utilisation du même chemin d'énergie minimale épuise les nœuds de ce chemin d'énergie de ce fait il est judicieux de choisir de manière probabiliste entre différents chemins existants entre la source et la destination.

#### II.2.2.2 Le routage basé sur la localisation

Dans ce type de routage, les nœuds capteurs sont adressés en fonction de leurs localisations. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée en fonction de la puissance du signal reçu (RSSI<sup>2</sup>). Les coordonnées relatives des nœuds voisins peuvent être obtenues en échangeant une telle information entre les voisins. Alternativement, la localisation des nœuds peut être disponible directement en communiquant avec un satellite en utilisant GPS (système de positionnement global) ou par le biais d'un nœud mobile diffusant à plusieurs endroits sa localisation qui pourra être captée par les nœuds capteurs se trouvant dans rayon de transmission. Dans la plupart des protocoles de routage, l'information sur la localisation des nœuds est nécessaire afin de calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée[21].

#### II.2.2.3 Le routage hiérarchique

Le routage hiérarchique est considéré comme étant l'approche la plus favorable en termes d'efficacité énergétique surtout dans les réseaux de capteurs à grande échelle.

---

<sup>2</sup> RSSI : *Received Signal Strength Indication*

Il se base sur le concept (nœud simple - nœud maître) où les nœuds simples acheminent leurs messages à leur maître, lequel les achemine ensuite dans le réseau tout entier via d'autres nœuds maîtres jusqu'à l'aboutissement à la station de base.

L'avantage principal ce type de routage est l'agrégation et la fusion des données afin de diminuer le nombre de messages redondants transmis à la station de base, ce qui permet une meilleure conservation de l'énergie. En fait, deux grandes approches sont dérivées de ce type de routage à savoir : chaîne-based approach (approche chaînée) comme PEGASIS et cluster-based approach (approche à grappe) comme LEACH[22].

### a) HEED (Hybrid, Energy-Efficient, Distributed approach)

Le protocole hybride HEED (Hybrid Energy Efficiency Distributed) est l'un des protocoles qui permettent d'augmenter la durée de vie dans les RCSFs. Ce protocole prend en compte deux paramètres pour déterminer les cluster-heads (chefs de groupes), à savoir l'énergie résiduelle et la densité des nœuds, et a été conçu pour les RCSFs homogènes.

Dans HEED, les cluster-heads communiquent directement avec la station de base ce qui permet de minimiser la consommation d'énergie. Cependant, dans HEED, la topologie en clusters ne réalise pas la consommation minimale d'énergie dans les communications intra-cluster et les clusters générés ne sont pas tellement équilibrés en taille[23].

### b) LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

LEACH est un protocole conçu pour les réseaux de capteurs où un utilisateur final souhaite surveiller l'environnement à distance. Dans une telle situation, les données des nœuds individuels doivent être envoyées à une station de base, souvent située loin du réseau de capteurs, par laquelle l'utilisateur final peut accéder aux données[24].

Il existe plusieurs propriétés souhaitables pour les protocoles conçus aux RCSFs :

- ✓ Supportent des réseaux de taille moyenne et à grande échelle de 100 à 1000 nœuds,
- ✓ Maximisent la durée de vie des réseaux,
- ✓ Maximisent la couverture de zone,
- ✓ Utilisent des nœuds uniformes de bon marché

Les protocoles de réseau conventionnels, tels que la transmission directe, une énergie de transmission minimale, le routage multi-sauts et la mise en cluster présentent tous des inconvénients qui ne leur permettent pas d'atteindre toutes les propriétés souhaitables.

LEACH permet deux types de communications : intra-cluster et inter-cluster pour réduire la consommation d'énergie et la rotation aléatoire des cluster-heads pour ne pas épuiser certains nœuds de leurs batteries rapidement. Ces fonctionnalités permettent à LEACH d'atteindre les propriétés souhaitées. Les études sur ce protocole montrent que LEACH est un protocole économe en énergie qui prolonge la durée de vie des RCSFs.

Il existe de nombreux simulateurs de réseau à la fois ouverts et commerciaux pour implémenter LEACH, tels que :

1. NS-2 et NS-3 (open source)
2. OPNET (proprietary software)
3. NetSim (proprietary software)
4. OMNeT++ (IDE)
5. TinyOS (open source)
6. MATLAB

### c) PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

PEGASIS est un protocole hiérarchique basé sur la chaîne la plus favorisée. Dans ce protocole, les nœuds sont organisés sous la forme d'une chaîne pour le transport et l'agrégation des données. La création de chaîne peut être centralisée en fonction de l'application. PEGASIS est basé sur l'hypothèse qu'une connaissance globale du réseau est fournie à tous les nœuds. La création de la chaîne commence à partir du dernier nœud du récepteur et son voisin le plus proche est sélectionné en tant que nœud suivant de la chaîne, etc. Le dernier nœud doit être le nœud destinataire et le nœud avant que celui-ci agisse en tant que leader du nœud. Le traitement des données et l'agrégation sont effectués par le nœud principal. PEGASIS n'est pas aussi pertinent pour les réseaux à topologie dynamique ou variant dans le temps. Comme la taille du réseau sera plus grande, le délai de transmission sera d'autant plus long que PEGASIS est soumis à un problème d'évolutivité[25].

### II.3. D'autres travaux antérieurs

Il existe plusieurs protocoles qui ont pour but de maximiser la durée de vie d'un réseau de capteurs, dans cette section nous nous sommes intéressés sur les protocoles de routage dans l'opération de formation de clusters est basée sur l'approche K-Means.

Dans[26], les auteurs ont proposé une approche K-Means distribuée dans laquelle le clustering est effectué par chaque nœud du réseau. Cette contribution est plus efficace que le clustering centralisé en terme de la vitesse du traitement, cependant la consommation d'énergie est presque la même dans les deux approches.

Dans[27], les auteurs ont proposé une approche de clustering basée sur K-Means pour minimiser la consommation d'énergie dans le réseau. Cette approche est adaptée pour les réseaux de stockage intégrés appelés KEAC. Dans KEAC, les cluster-heads sont élus en fonction de l'énergie restante et de la distance qui les sépare de leurs centres de gravité. Les CHs générés sont uniformément distribués dans le réseau en fonction de leurs poids et permettent une communication directe avec la station de base (un seul saut). A cet effet, la minimisation de la consommation d'énergie mène à prolonger la durée de vie du réseau, cependant l'ajustement de la radio pour communiquer avec la station de base peut augmenter les frais de ce protocole.



Dans[28], les auteurs ont proposé un schéma de routage hybride qui combine entre l'approche K-Means et le protocole LEACH. K-Means est utilisée pour regrouper les nœuds capteurs en clusters et LEACH est utilisé pour sélectionner les cluster-heads. Les résultats de simulation ont montré que ce protocole surpasse LEACH en termes de la consommation d'énergie et de la durée de vie du réseau mais la principale faiblesse de ce protocole est la grande énergie consommée durant le processus d'élection des cluster-heads.

### II.4 Clustering et partitionnement de données

#### II.4.1 Définition

Le clustering est un processus qui regroupe un ensemble d'objets (physiques ou abstraits) en clusters similaires de telle sorte que les données du même cluster aient des caractéristiques similaires, et celles appartenant à des clusters distincts soient dissimilaires.

Le clustering est une des méthodes d'analyse des données. Elle vise à diviser un ensemble de données en différents « paquets » homogènes, en ce sens que les données de chaque sous-ensemble partagent des caractéristiques communes, qui correspondent le plus souvent à des critères de proximité (similarité informatique) que l'on définit en introduisant des mesures et classes de distance entre objets[29].

#### II.4.2 Clustering basé sur une représentation non supervisée

##### II.4.2.1 L'approche K-Means

L'approche K-Means[30] est utilisée pour regrouper les éléments d'un ensemble de données en k clusters autour d'un centre de gravité (centroid). En général on ne connaît pas le nombre de classes que contient l'ensemble de données.

Étant donné un ensemble de points  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , on cherche à partitionner les n points en k ensembles  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$  ( $k \leq n$ ) en minimisant la distance entre les points à l'intérieur de chaque partition :

$$\underset{S}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - u_i\|^2 \quad (1)$$

où  $u_i$  est le barycentre des points dans  $S_i$ .

La méthode des k-means se déroule comme suit :

1. On tire au hasard k centres de gravité. Ces centres peuvent être tirés parmi les exemples de la base d'apprentissage.
2. On associe chaque exemple de l'ensemble de données au centre de gravité le plus proche. Après cette étape tous les exemples ont été affectés à un centre.

3. Chaque centre est mis à jour à l'aide de la moyenne des exemples qui lui sont associés.
4. Puis on recommence les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que les exemples affectés à un centre ne changent plus.

La complexité de cet algorithme est en  $O(kni)$

Avec « n » est le nombre de données dans l'ensemble de données, et « i » le nombre d'itérations.

Il existe une variante de ce méthode, qui s'appelle le k-means++ [31]. Cette variante est une amélioration de la version originale de K-means et consiste à changer la manière d'initialiser les centres de gravité.

### II.4.2.2K-médianes

L'algorithme des k-médianes est similaire à l'algorithme des k-means en utilisant la médiane au lieu de la moyenne. Cet algorithme est souvent confondu avec celui des k-médoïdes (aussi appelé k-médianes discrètes).

On définit la médiane (géométrique) d'un ensemble de points comme le point artificiel qui minimise:

$$\sum_{x \in X} \|c - x\|_2 \quad (2)$$

Avec « x » qui décrit les points de l'ensemble

Il n'y a aucune formule analytique pour calculer la médiane géométrique exacte à partir d'un ensemble de points. Par conséquent en pratique on cherche à approximer cette médiane.

L'algorithme des k-médianes semble être le plus performant pour trouver une excellente solution au problème de partitionnement en k clusters, en revanche sa complexité est vraiment très élevée et il ne peut pas être appliqué sur de grande bases de données.

La méthode des k-médianes s'exécute ainsi :

1. On initialise k médianes (par exemple aléatoirement)
2. On associe chaque élément de l'ensemble de données à la médiane la plus proche de lui.
3. Puis pour chaque ensemble associé à une médiane, on recalcule une approximation de sa médiane.
4. On recommence les étapes 2 et 3 à nouveau jusqu'à ce que les points associés à une médiane ne changent plus.

### II.4.2.3K-modes

La méthode des k-modes est similaire à celle des k-moyennes mais adaptée pour les objets catégorisés qui sont des objets qui ne contiennent pas de valeurs numériques mais des chaînes par exemple [32].

Le principe de la méthode des k-modes se déroule ainsi :

1. On initialise k-modes (aléatoirement par exemple).
2. On associe chaque objet de l'ensemble de données au mode le plus proche ou le plus similaire à lui.
3. Puis on recalcule les modes de chaque ensemble, à partir de la fréquence des champs des objets.
4. Et on recommence les étapes 2 et 3, jusqu'à ce que les modes ne changent plus.

### II.4.3 Méthodes de clustering

Les méthodes de clustering sont généralement classifiées en quatre catégories majeures :

#### II.4.3.1 Les méthodes hiérarchiques

Dans un clustering hiérarchique, un cluster peut être divisé en sous clusters. L'ensemble des clusters étant généralement représenté par un arbre. Un objet appartient à une et une seule feuille dans la hiérarchie, mais également à son nœud père, et ainsi de suite jusqu'à la racine. Les méthodes de clustering hiérarchique permettent d'obtenir ce type de résultats.

Il existe deux types d'approches de clustering hiérarchique :

- Les approches par agglomération (ou ascendantes).
- Les approches par division (ou descendantes).

#### II.4.3.2 Les méthodes de partitionnement

Les méthodes de partitionnement ont généralement comme résultat un ensemble de M clusters, chaque objet appartenant à un seul cluster. Chaque cluster peut être représenté par un centroid (représentant du cluster) qui peut être considéré comme une description récapitulative de tous les objets contenus dans le cluster. La forme précise de cette description dépendra du type des objets qui sont groupés.

Au cas où les données à valeurs réelles sont disponibles, la moyenne arithmétique des vecteurs d'attribut pour tous les objets dans un cluster fournit un représentant approprié ; des types alternatifs de centroid peuvent être requis dans d'autres cas.

Si le nombre de clusters est élevé, les centroids peuvent encore être groupés de manière hiérarchique.

#### II.4.3.3 Les méthodes basées sur la densité

Les algorithmes basés sur la densité sont capables de découvrir des clusters de formes arbitraires, ce qui assure l'isolement des bruits et la prévention contre la formation de clusters non pertinents.

Ces algorithmes groupent des objets selon des fonctions de densité spécifiques. La densité est habituellement définie comme nombre d'objets dans un voisinage particulier des éléments de données.

Dans cette approche, un cluster donné continue à augmenter de taille tant que le nombre d'objets dans le voisinage dépasse un certain seuil.

### II.4.3.4 Les méthodes basées sur la grille

Un algorithme de clustering basé sur les grilles utilise des structures de données multi-résolution, où l'espace d'objets est quantifié en un ensemble de cellules, puis identifie l'ensemble de cellules denses connectées pour former des clusters.

### II.4.4 Domaines d'applications du clustering

Le clustering possède des domaines d'applications extrêmement variés, parmi lesquels :

- **Le Marketing** : segmentation du marché en découvrant des groupes de clients distincts à partir de bases de données d'achats.
- **L'environnement** : identification des zones terrestres similaires dans une base de données contenant des informations (en termes d'utilisation) de la terre.
- **Les assurances** : identification de groupes d'assurés distincts associés à un nombre important de déclarations.
- **La planification des villes** : identification de groupes d'habitations suivant leurs types, valeur, localisation géographique.
- **La médecine** : Localisation de tumeurs dans le corps humain. Par exemple, dans un nuage de points fournis par le scan du cerveau, on identifie les points définissant une tumeur.
- **La segmentation d'images** : Détection des zones homogènes dans une image.
- **Web log analysis** : Identification de profils d'utilisateurs à travers leur flux de clics (Clickstream).
- **Text mining** : Classification des textes selon leur similitude dans des dossiers automatiques.

### II.4.5 Types de transmission dans le routage

La maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteur dépend fortement de certaines solutions de routage. Dans cette partie nous présentons quelques schémas de routage utilisant le multi-saut. Dans [33], les auteurs ont proposé deux versions améliorées de LEACH : Energy-LEACH et Multihop-LEACH. Le protocole Energy-LEACH permet de choisir comme cluster-heads les nœuds qui ont plus d'énergie résiduelle, cependant le protocole multihop-LEACH permet d'améliorer la communication entre les CHs et entre les CHs et la station de base.

Dans [34], les auteurs ont proposé deux protocoles LEACH-D et LEACH-L. Ces deux protocoles travaillent en boucle, et chaque tour est divisé en phase d'établissement et en phase de stabilisation. Dans LEACH-L, les CHs fusionnent les données provenant des nœuds membres. Si les CHs sont proches de la station de base, ils envoient les données directement à la station de base, sinon ils optent pour une stratégie multi-sauts dans laquelle le prochain saut est choisi en fonction de son énergie et de la distance qui le sépare de la station de base.

### II.4.6 Greedy forwarding

La méthode "Greedy Forwarding" est une stratégie qui utilise la distance ou la direction des nœuds comme paramètres pour choisir le prochain saut du chemin de la source vers la destination.

Greedy Forwarding basée sur la distance consiste à minimiser le nombre de sauts car chaque cluster-head envoie la donnée au voisin le plus proche à la station de base jusqu'à ce que la donnée atteigne envoyée à la station de base.

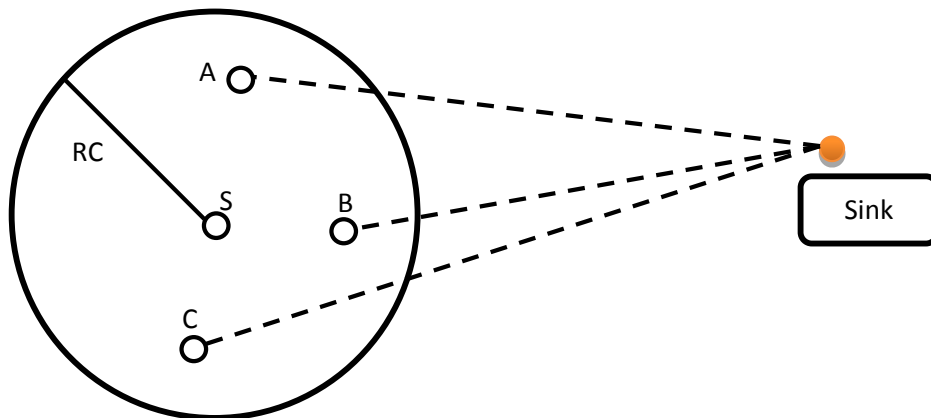


Figure II. 2: Greedy Forwarding basée sur la distance

La figure II.2 représente un exemple de la stratégie Greedy Forwarding basée sur la distance où RC est la plage de transmission du capteur S. Chaque fois que le nœud S a un paquet de donnée à envoyer à la station de base, il choisit le voisin le plus proche à la station de base comme prochain saut (le nœud B dans cet exemple). Ce processus de routage sera répété de la même manière jusqu'à ce que le paquet de données atteigne la station de base.

### II.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les types de routage dans les RCSFs et les protocoles de routage les plus répandus associés à ces types. Nous avons détaillé certaines méthodes de partitionnement telle que K-means et enfin nous avons présenté les stratégies de routage dans les RCSFs en la méthode Greedy Forwarding que nous avons utilisée dans notre application.



---

## CHAPITRE III

# Schéma de routage basé sur le clustering pour les RCSFs

---



# Chapitre III :

## Schéma de routage basé sur le clustering pour les RCSFs

### III.1 Introduction

Après avoir étudié les techniques de routage dans les réseaux de capteurs sans fil, nous proposons une nouvelle approche basée sur le clustering et une amélioration du Greedy Forwarding, pour faire face au passage à l'échelle et pour réduire la consommation de l'énergie. Cette approche concerne une adaptation d'une nouvelle méthode de clustering aux réseaux de capteurs sans fil permettant d'éviter de définir le nombre de clusters comme paramètre initial contrairement à K-means. Notre contribution utilise une méthode distribuée basée sur deux paramètres pour l'élection des cluster-heads.

### III.2 K-means

K-Means [35] est l'un des algorithmes d'apprentissage non supervisé les plus simples permettant de résoudre le problème de clustering. La procédure utilisée par K-Means suit un moyen simple pour classer un ensemble de données avec un nombre de clusters donné.

L'idée principale est de définir un centroid pour chaque cluster.

L'étape suivante consiste à prendre chaque point appartenant à un ensemble de données et l'associer au centroid le plus proche. Lorsqu'aucun point n'est en attente, la première étape est terminée et les clusters sont formés.

Ensuite, les k nouveaux centroids des clusters qui ont été déjà formés précédemment sont recalculés.

Une fois que les k nouveaux centroids sont recalculés, une nouvelle liaison doit être effectuée entre les mêmes points et le nouveau centroid le plus proche.

Une boucle est générée jusqu'à ce que les k centroids ne changent plus d'emplacement, c'est-à-dire que les centroids ne bougent plus.

Enfin, cette technique vise à minimiser la fonction objective suivante :

$$J = \sum_{j=0}^K \sum_{i=0}^n \|x_i^j - C_j\|^2 \quad (3)$$

Où  $\|x_i^j - C_j\|^2$  est une mesure de distance choisie entre un point de données  $x_i^j$  et le centre du groupe  $C_j$ . Ceci est un indicateur de la distance entre les  $n$  points de données et leurs centres de cluster respectifs.

K-means est composé des étapes suivantes :

- 1) Placer  $K$  points dans l'espace représenté par des objets. Ces points représentent les centroides du groupe initial.
- 2) Affecter chaque objet au groupe qui a le centroid le plus proche.
- 3) Lorsque tous les objets ont été affectés, recalculer les positions des centroides  $K$ .
- 4) Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que les centroides ne disparaissent plus. Cela produit une séparation des objets en groupes à partir de laquelle la métrique à minimiser peut être calculée.

### III.3. La méthode silhouette [36]

La méthode Silhouette fournit un moyen quantitatif pour mesurer la position de chaque élément dans son cluster par rapport aux autres.

La moyenne de la méthode silhouette de chaque point est une mesure de la similitude d'un point avec les points de son propre cluster par rapport aux points de départ des autres clusters. La valeur Silhouette d'un point de données est définie comme suit:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))} \quad (4)$$

Où,  $a(i)$  est la moyenne de la distance entre le  $i^{\text{ème}}$  point et les autres points du même cluster.

Soit  $b(i, k)$  la moyenne de la distance entre le  $i^{\text{ème}}$  point et les autres points du cluster.

Alors «  $b(i)$  » est le minimum de «  $b(i, k)$  » sur tous les clusters aux quelles le point de repère n'est pas attribué. La valeur de  $S(i)$  n'est pas supérieure à 1, et si  $S(i)$  est proche de 1, cela indique que le point concerné est bien dans son propre cluster.

La méthode Silhouette est composée des étapes suivantes:

- Exécuter K-means en faisant varier le nombre de clusters de 1 à max,
- Pour chaque  $k$ , calculer la moyenne de la méthode silhouette des observations,
- Tracer la courbe de avg selon le nombre de clusters  $k$ ,
- L'emplacement du maximum est considéré comme le nombre approprié de clusters.



### III.4. La méthode de k-means distribuée dans les réseaux de capteurs

Les auteurs dans [35] ont proposé un nouveau schéma appelé K-means distribué dans lequel le processus de clustering est exécuté de manière distribuée dont le processus d'élection des cluster-heads est basé sur la distance par rapport aux centroids et l'énergie résiduelle comme s'illustré par l'équation (5).

Le schéma de routage proposé se déroule en deux phases: la phase Set-up et la phase steady-state. Dans la phase set-up la méthode K-means est utilisée pour la formation des clusters durant la première période et l'élection des cluster-heads se fait de manière distribuée. Chaque nœud envoie son coût à tous les membres de son cluster. Le nœud dont le coût est le plus élevé devient CH en tenant compte de l'énergie résiduelle et de la distance par rapport aux centroids selon l'équation suivante :

$$Cost(Nœud_i) = \alpha * Energie + \frac{\beta}{dist(Nœud_i, centroid)} \quad (5)$$

Avec :

$$\alpha = 0.95 \quad \text{et} \quad \beta = 0.05$$

Dans la deuxième phase, chaque membre du cluster envoie les données collectées à son CH respectif en fonction de son slot TDMA. Une fois que tous les paquets ont été reçus par le CH, ce dernier les regroupe dans un seul paquet et le transmet vers la station de base. Ce schéma de regroupement basé sur l'approche K-means offre de meilleures performances que le protocole LEACH.

### III.5. Le principe du schéma de routage proposé

La solution de routage proposée permet de former des clusters en se basant sur la distance entre les nœuds en tenant compte du nombre des nœuds par cluster, tels que ce nombre dépasse un certain seuil. Ensuite, le nœud qui a l'énergie maximale et la meilleure position pour chaque cluster, est élu comme cluster-head. En outre, chaque cluster-head identifie le prochain saut vers la station de base pour construire son chemin basé sur Greedy Forwarding et commence la transmission des données.

#### III.5.1. Les avantages

- La transmission multi-saut inter-cluster a un avantage par rapport à la transmission directe à la station de base (en un seul saut).
- La méthode de clustering utilisée permet de garantir le passage à l'échelle.
- La sélection des clusters-heads n'est pas fixée et elle est déclenchée par une condition.
- L'élection du cluster-head est indépendante de la station de base.
- L'élection des cluster-heads a une efficacité d'élargir la durée de vie du réseau.

### III.5.2. Les inconvénients

Dans cette approche de routage proposée, les nœuds sont toujours affiliés à un même cluster et le processus de clustering est statique.

### III.5.3. Le Schéma de routage proposé

Le schéma de routage hiérarchique proposé se déroule en rounds et dans chaque round il y a deux étapes : une étape pour le clustering et une autre pour la construction des chemins.

1) La première étape vise à organiser le réseau en clusters et se divise en deux phases : la formation des clusters et l'élection des cluster-heads.

#### Formation des clusters

Au début, la station de base lance le premier round. Chaque nœud calcule la distance moyenne par rapport aux autres nœuds. Ensuite les clusters sont formés en fonction de la distance moyenne et chaque cluster va contenir les nœuds les plus rapprochés. Pour éviter le problème de clusters non homogènes en termes de nombre de nœuds par cluster à d'autres clusters, nous allons enlever les nœuds appartenant à des clusters qui ont un nombre de nœuds inférieurs à un certain seuil. Puis, nous associons chaque nœud restant au cluster le plus proche en se basant sur la distance entre le nœud et les centroids des clusters.

#### L'élection des cluster-heads

Chaque nœud vivant va calculer son score en fonction de la distance moyenne et de l'énergie restante du nœud selon l'équation suivante:

$$\text{Cost}(\text{Nœud}_i) = \alpha * \text{Energie}_{\text{RES}}(\text{Nœud}_i) + \frac{\beta}{\text{Dist}_{\text{Moy}}(\text{Nœud}_i)} \quad (6)$$

Avec :

$$\alpha = 0.95 \quad \text{et} \quad \beta = 0.05$$

La distance Moyenne  $\text{Dist}_{\text{Moy}}$  : c'est la moyenne des distances de chaque nœud par rapport aux autres nœuds dans le même cluster selon l'équation suivante :

$$\text{Dist}_{\text{Moy}}(\text{Nœud}_i) = \frac{\sum_{j=1}^n \text{Dist}(\text{Nœud}_i, \text{Nœud}_j)}{n - 1} \quad (7)$$

Avec :

n : le nombre des nœuds par chaque cluster

Après, chaque nœud envoie son coût exprimé par l'équation (7) aux autres nœuds du même cluster et le nœud ayant le coût le plus élevé va être élu comme cluster-head.

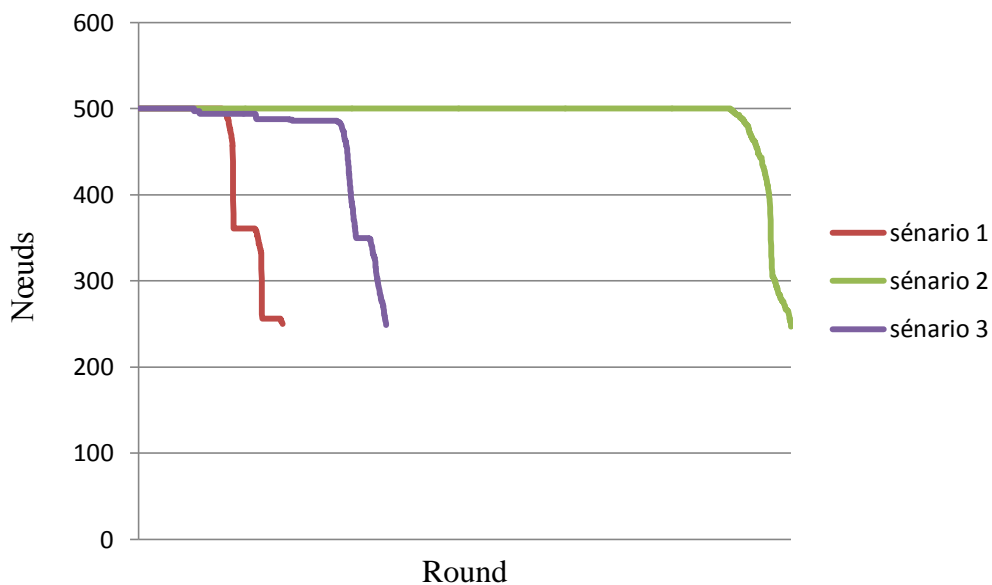
Il existe trois scénarios :

- ✓ Soit on renouvelle l'élection pour chaque round (scénario 1).
- ✓ Soit on renouvelle l'élection si l'énergie de l'un des cluster-heads est réduite à la moitié (scénario 2).
- ✓ Soit si l'énergie de l'un des cluster-heads est épuisée totalement. (scénario 3).

Dans notre stratégie, l'élection des CHs sera renouvelée si l'énergie de l'un des cluster-heads est réduite à la moitié.

#### III.5.4 Une comparaison entre les trois scénarios :

##### a) Durée de vie du réseau



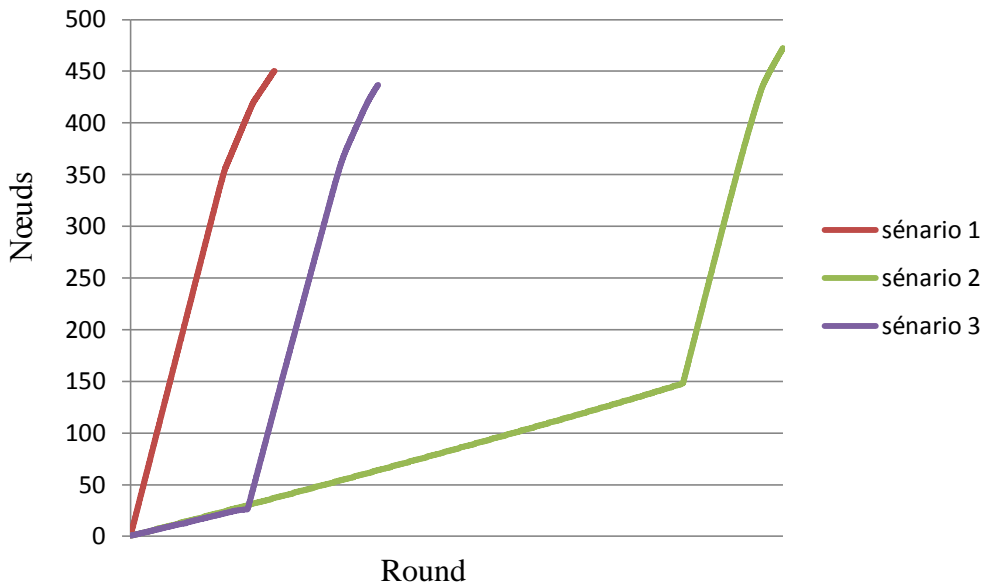
**Figure III.1** Nombre de nœuds vivants en fonction du nombre de rounds

Dans le premier scénario Nous constatons que le premier nœud meurt au 528<sup>ème</sup> round, alors que dans le 3<sup>ème</sup> scénario le premier nœud meurt au 353<sup>ème</sup> round.

La moitié des nœuds dans le premier scénario meurent aux 912<sup>ème</sup> rounds, et dans le 3<sup>ème</sup> scénario meurent après 1568<sup>ème</sup> rounds, donc la durée de vie du réseau utilisant le 3<sup>ème</sup> scénario est plus longue que celle du 1<sup>er</sup> scénario.

Dans le 2<sup>ème</sup> scénario le premier nœud meurt après 3749<sup>ème</sup> rounds, alors que la moitié des nœuds meurent au 4132<sup>ème</sup> round, ce qui indique que le 2<sup>ème</sup> scénario est beaucoup meilleur que les autres scénarios.

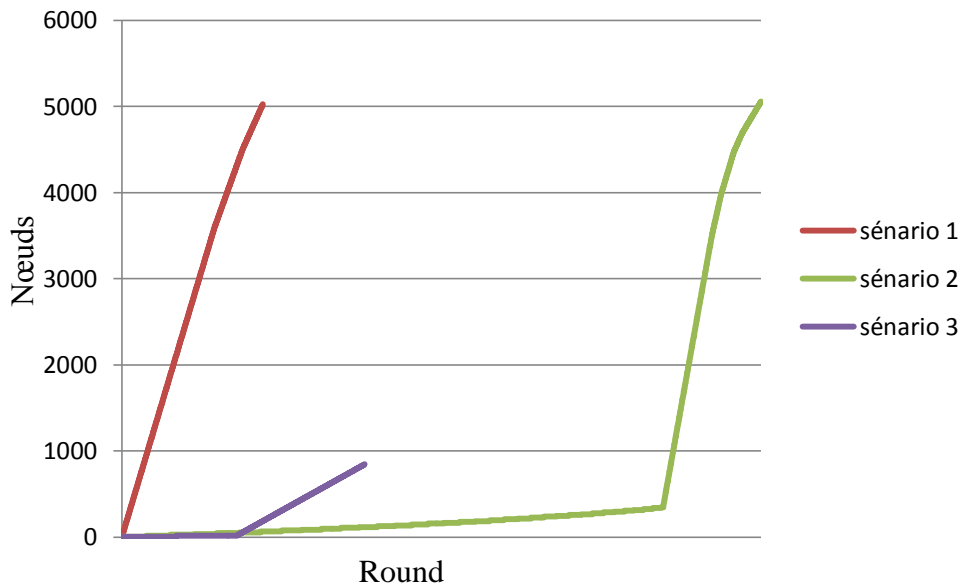
**b) La consommation d'énergie**



**Figure III.2** Consommation d'énergie

La figure III.2 montre la consommation d'énergie pendant la durée de vie du réseau par le protocole de routage proposé. Le 2<sup>ème</sup> scénario (renouvellement de l'élection si l'énergie de l'un des cluster-heads est réduite à la moitié) offre de meilleurs résultats que les deux autres scénarios.

**c) Nombre de paquets envoyés à la station de base**



**Figure III.3** Nombre de paquets envoyés à la station de base

La figure III.3 montre que le nombre de paquets envoyés à la station de base quand on utilise le 2<sup>ème</sup> scénario la consommation d'énergie est réduite ce qui permet de prolonger la durée de vie du réseau par rapport aux autres scénarios.

2) La deuxième étape contient deux phases la construction des chemins et l'envoi des données

#### Construction des chemins

La transmission inter-cluster utilise le mode multi-saut et le choix du prochain saut est fait par une amélioration de la méthode Greedy Forwarding en se basant sur deux facteurs : l'énergie résiduelle du nœud (prochain saut) et la distance qui le sépare à la station de base.

En plus des fonctionnalités du cluster-head, il va aussi jouer le rôle de nœud relais. Chaque cluster-head envoie son score défini dans l'équation(8) à ses voisins cluster-heads.

$$\text{Cost}(\text{Nœud}_i) = \alpha * \text{Energie}_{\text{RES}}(\text{Nœud}_i) + \frac{\beta}{\text{Distance}(\text{Nœud}_i, \text{BS})} \quad (8)$$

Avec :  $\alpha = 0.75$  et  $\beta = 0.25$

Chaque cluster-head choisit le cluster-head qui a le plus grand score comme prochain saut. Nous avons favorisé le coefficient de la distance par rapport à l'énergie pour préserver le principe de l'approche "Greedy Forwarding".

#### L'envoi des données

Une fois que la création des clusters associés et la construction des chemins sont achevées, la transmission des données peut commencer. Chaque nœud envoie ces données à son cluster-head associé en mode mono-saut et chaque cluster-head agrège les données reçues en un seul paquet et l'envoie au cluster-head suivant jusqu'à ce qu'il atteigne la station de base.

### III.6 Description du déroulement du protocole

Le protocole proposé se déroule en périodes et chaque période se compose de deux étapes :

a) La première étape pour le clustering qui consiste à la formation des clusters et à l'élection des cluster-heads.

#### Formation des clusters

La première phase de notre protocole consiste au premier lieu à construire des clusters selon l'organigramme suivant:

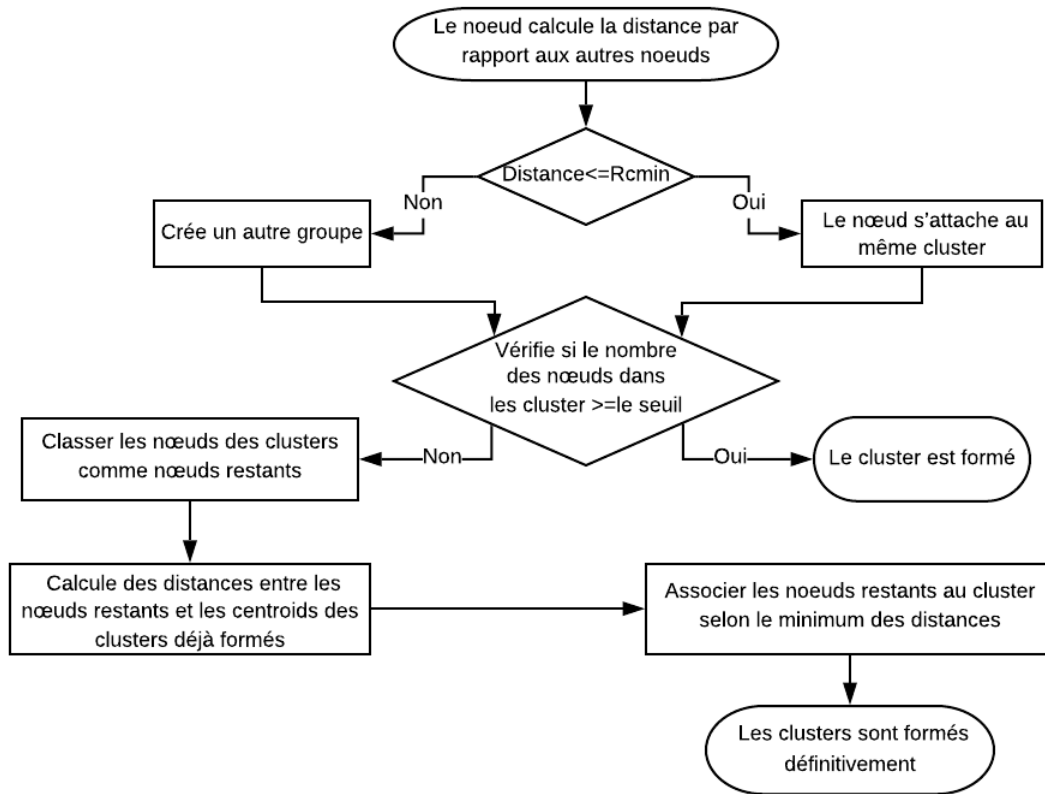


Figure III.4 Schéma de création des clusters

**L'élection du cluster-head**

Une fois la construction des clusters est achevée, la création des CHs commence au niveau de chaque cluster selon l'organigramme suivant :

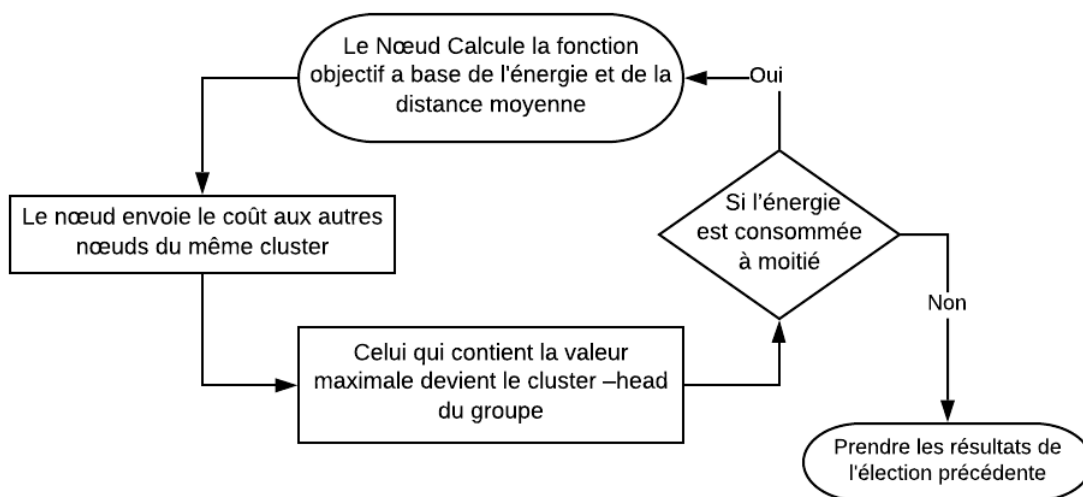


Figure III.5 Processus d'élection des cluster-heads

b) La deuxième étape concerne la transmission de données qui se compose en deux phases construction des chemins et l'envoi des données.

**Construction des chemins**

Quand le processus d'élection des CHs est terminé, l'étape de la construction des chemins commence, selon l'organigramme suivant :

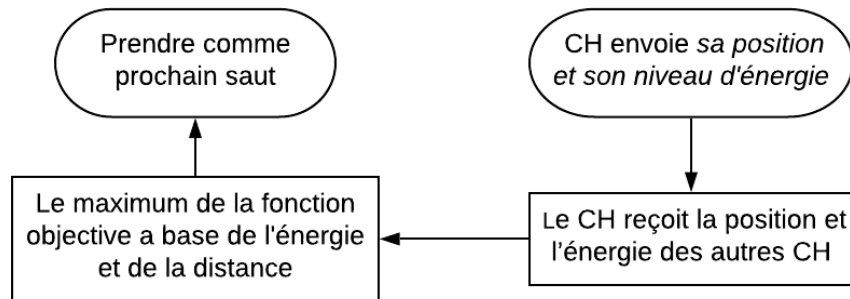


Figure III.6 Schéma de construction des chemins

**L'envoi des données**

Cette phase consiste de transmettre les données collectées par les nœuds à leurs cluster-head, ensuite chaque CH transfère ces données au CH voisin ayant le plus grand score (prochain saut) jusqu'à la station de base selon l'organigramme suivant:

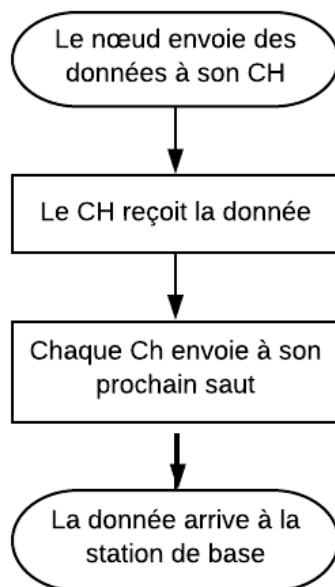


Figure III.7 Schéma de transmission des données

### III.7 Simulation et analyse des performances

Dans cette section, nous présentons les résultats des simulations fournis par notre protocole proposé. Les simulations effectuées permettent d'évaluer les performances de notre solution de routage proposée et consolider nos affirmations.

Nous avons choisi Matlab Simulator pour le développement de la solution de routage proposée car il dispose d'une large bibliothèque de fonctions en particulier celles qui manipulent les vecteurs et les matrices.

#### III.7.1 L'environnement d'implémentation

##### III.7.1.1 Modèle Energétique

Nous avons utilisé le modèle énergétique utilisé dans LEACH[39]. La consommation d'énergie est principalement divisée en deux parties: l'énergie de réception et l'énergie de transmission de donnée.

La consommation d'énergie de transmission vers la destination nécessite une énergie supplémentaire pour amplifier le signal en fonction de la distance.

Les paramètres	Les valeurs
La surface du réseau	100*100
Localisation de la station de base	(50,170)
Le nombre des nœuds	500
L'énergie initiale des nœuds	1J
E <sub>tx</sub> (énergie de transmission)	50 nJ
E <sub>rx</sub> (énergie de réception)	50Nj
E <sub>fs</sub>	10pJ/bit/m <sup>2</sup>
E <sub>mp</sub>	0.0013pJ/bit/m <sup>4</sup>
EDA	5nJ/bit/signal
Taille de paquet de donnée	4000 bytes
Taille de paquet de contrôle	200 bytes
R <sub>cmin</sub> (la distance maximale entre les nœuds dans le même cluster)	30

**Tableau III.1** : Les paramètres de la simulation

Pour transmettre un message de k-bit à une distance d, la radio dépense de l'énergie comme décrit l'équation (9)

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} k * E_{elec} + \epsilon_{fs} * d^2 & , \quad si \quad d < d_0 \\ k * E_{elec} + \epsilon_{amp} * d^4 & , \quad si \quad d \geq d_0 \end{cases} \quad (9)$$

Où E<sub>elec</sub> est l'énergie consommée par la radio, E<sub>frissamp</sub> et E<sub>tworay amp</sub> sert à amplifier le signal.



La consommation de l'énergie de réception est exprimée par l'équation (10).

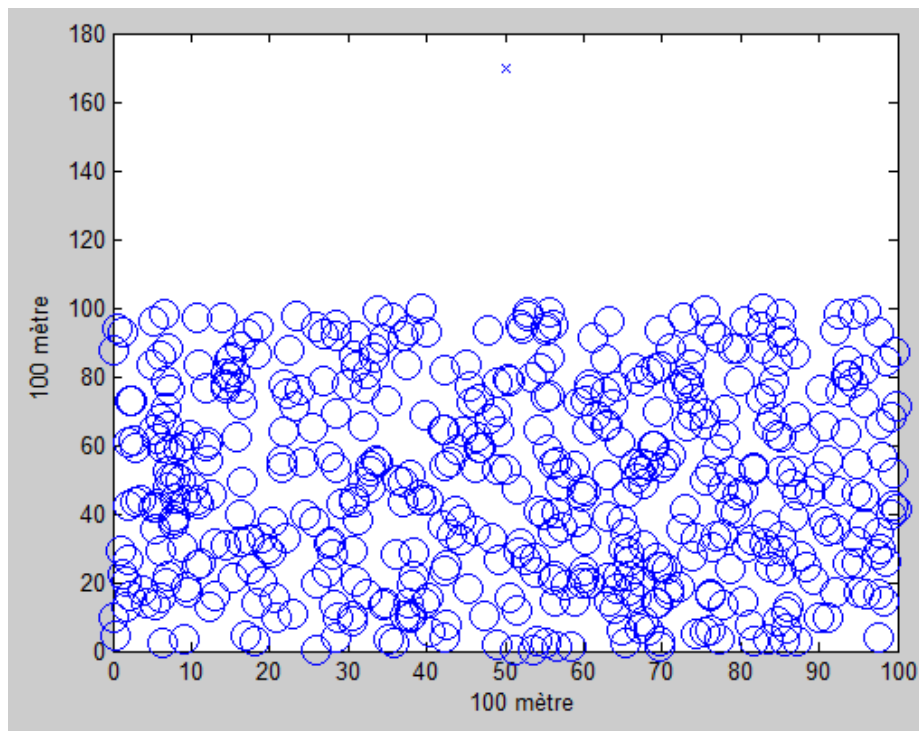
$$E_{Rx}(k) = k * E_{elec} \quad (10)$$

Dans cette simulation, notre modèle d'expérimentation est établi selon les paramètres suivants et que tous les nœuds sont statiques sur la surface du réseau.

La simulation s'arrête lorsque la moitié des nœuds du réseau épuisent leurs batteries.

#### III.7.1.2 Déploiement des nœuds capteurs

500 nœuds capteurs sont aléatoirement déployés sur une zone d'intérêt de 100x100 m<sup>2</sup> de surface. La station de base est positionnée aux coordonnées (50m,170m). Initialement, il n'y a pas de CHs, et tous nœuds sont tous de type normal (voir figure III.8).



**Figure III.8** Déploiement aléatoire de 500 nœuds capteurs

#### III.7.1.3 Nombre de clusters

Après le déploiement des nœuds, les clusters sont formés et le nombre de clusters est fixé. Chaque cluster prend une couleur différente pour différencier entre tous les clusters comme montre la figure III.9.

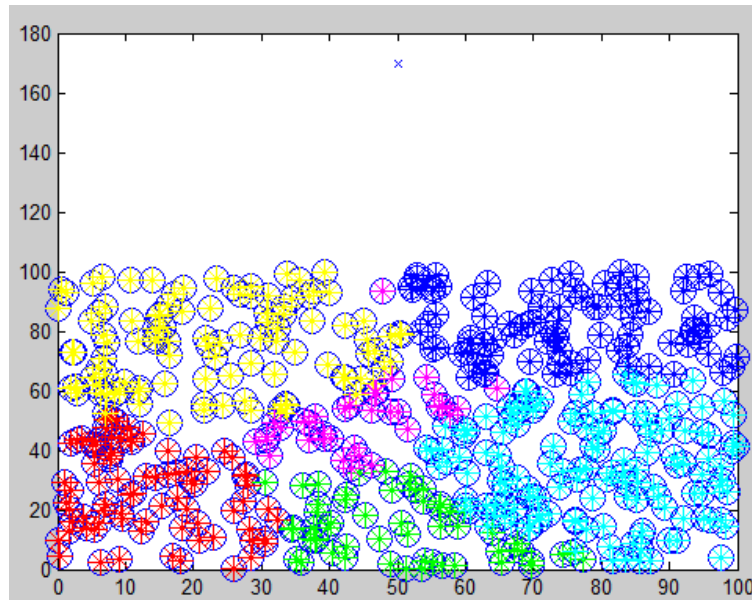


Figure III.9 Formation des clusters avec le protocole proposé

### III.8. Evaluation et comparaison des résultats

Dans cette section, nous évaluons la solution de routage proposée, une solution de routage basée sur K-means et le protocole LEACH. Les figures III.9 et III.10 présentent les clusters formés par notre solution de routage (6 clusters) et celle de K-means (4 clusters). Le nombre de clusters est déterminé par la méthode Silhouette dans le protocole basé sur K-means.

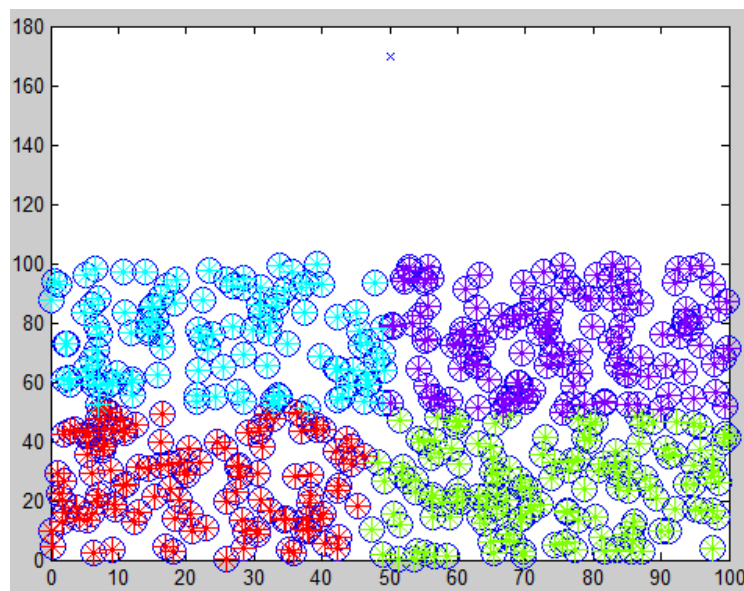
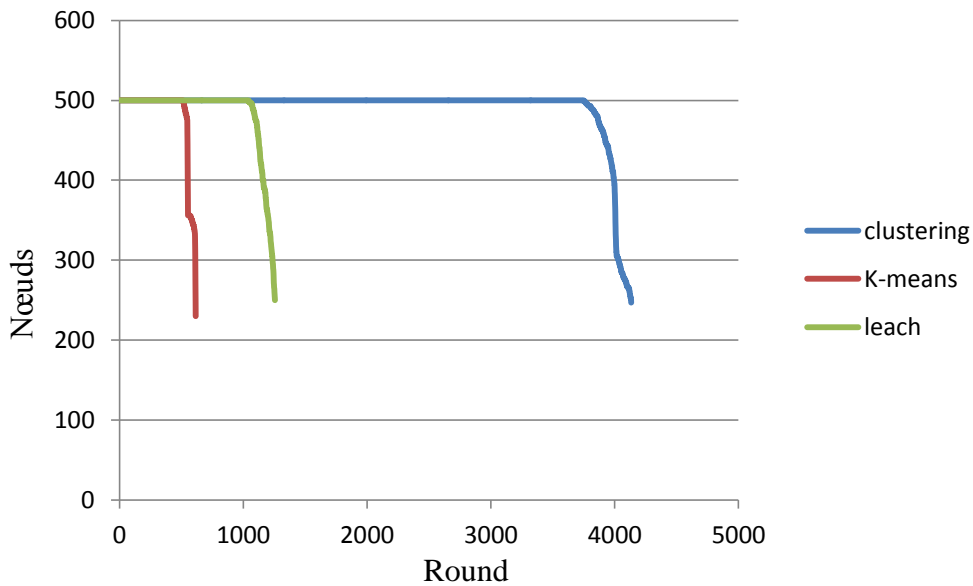


Figure III.10 Formation des clusters (K-means)

Dans cette partie, nous avons comparé notre protocole proposé avec deux autres protocoles (LEACH et le protocole basé sur K-means distribuée) en termes de la durée de vie du réseau, de la consommation d'énergie et du nombre de paquets envoyés à la station de base.

### III.8.1 Durée vie de réseau



**Figure III.11** Nombre de nœuds vivants vs. Nombre des rounds

Nous constatons que le premier nœud meurt au 1042<sup>ème</sup> round avec le protocole LEACH, alors qu'avec le protocole K-means c'est au 514<sup>ème</sup> round. En outre, la moitié des nœuds avec le protocole LEACH épuisent leurs batteries au 1255<sup>ème</sup> rounds, et avec le protocole K-means c'est au 615<sup>ème</sup> rounds. Donc, le protocole LEACH permet de prolonger la durée de vie du réseau plus que protocole basé sur K-means.

Dans notre protocole, le premier nœud meurt à la 3749<sup>ème</sup> période, alors que la moitié des nœuds meurent après 4132<sup>ème</sup> périodes, ce qui indique que le protocole proposé permet une longue durée de vie par rapport aux protocoles K-means et LEACH.

Les meilleures performances fournies par la solution de routage basée sur le clustering est justifiée par les chemins (CH-to-CH) établis qui sont économes en énergie.

### III.8.2 La consommation d'énergie

La figure III.12 montre la consommation d'énergie pendant la durée de vie du réseau (exprimée en Joules). Le schéma de routage proposé offre de meilleurs résultats que le schéma de routage distribué K-Means et le protocole LEACH en raison de la bonne répartition de la consommation d'énergie pendant la durée de vie du réseau.

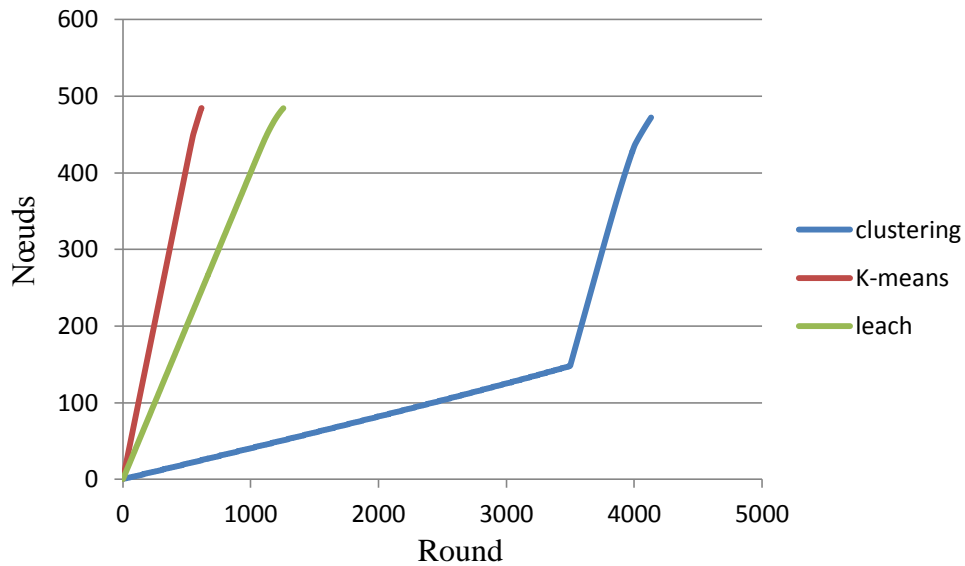


Figure III.12 Consommation d'énergie

### III.8.3 Nombre de paquets envoyés à la station de base

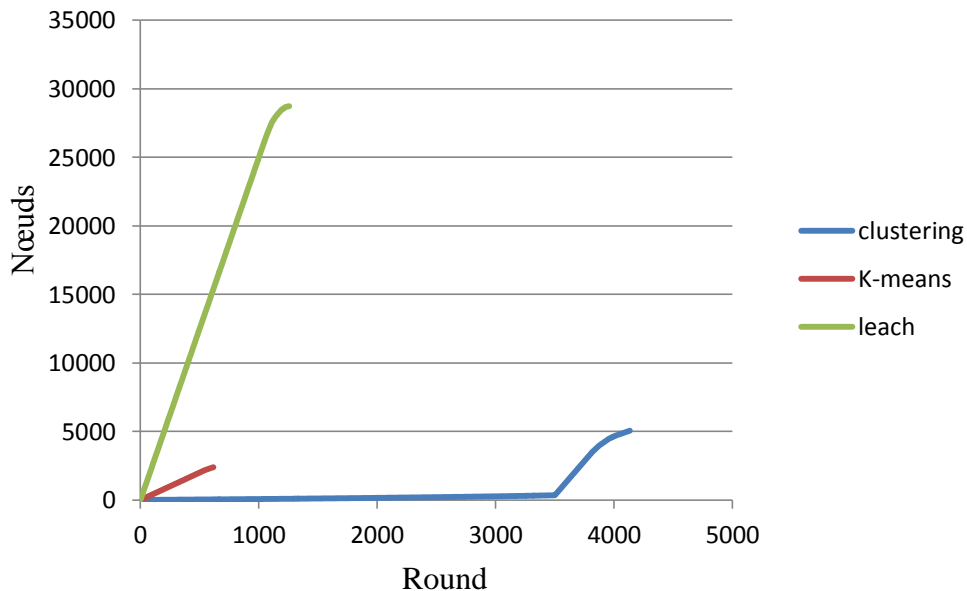


Figure III.13 Nombre de paquets envoyés à la station de base

Dans le protocole basé sur K-means, les cluster-heads envoient des données directement à la station de base comme dans le cas de LEACH. La figure III.13 montre que dans LEACH le nombre de paquets envoyés est très grand à cause du grand nombre de clusters formés (25 clusters dans ce scénario) où chaque CH envoie un paquet après l'expiration d'une période.

Les résultats de simulation montrent que notre protocole permet de réduire la consommation d'énergie et de prolonger la durée de vie du réseau par rapport aux autres protocoles en raison de la bonne répartition de la consommation d'énergie.

### **III.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, un nouveau protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs sans fil a été proposé. Ce protocole fournit une nouvelle approche efficace pour réduire la consommation d'énergie.

Au cours des travaux à venir, nous aurons tendance à optimiser les solutions de routage proposées afin d'offrir de meilleures performances que celles obtenues.



---

# CONCLUSION GENERALE

---



# Conclusion générale

Dans ce projet, nous avons découvert la façon de réaliser un projet, nous avons appris à savoir chercher, à savoir traiter les problèmes, et surtout à travailler collectivement et à s'aider pour enfin devenir capable et arriver à notre but.

Les RCSFs sont des réseaux ad-hoc composés de dispositifs minuscules qui ont des capacités de mémoire, calcul, et énergie limitée. Dans le cadre de notre projet, nous avons proposé une nouvelle approche de clustering et nous nous sommes intéressés à améliorer la méthode Greedy Forwarding. Cette approche consiste à réduire la distance entre les nœuds capteurs pour consommer moins d'énergie lors de la transmission des données et par conséquent pour rendre meilleure la durée de vie du réseau.

En perspectives, nous proposons comme amélioration de ce travail l'utilisation du clustering dynamique au lieu du clustering statique pour que les nœuds ne soient pas toujours affectés au même cluster.

## Références

- [1] Y. Challal, "Réseaux de capteurs sans fils," *Cours, Systèmes Intelligents pour le Transport, Université de Technologie de Compiègne, France*, vol. 17, 2008.
- [2] J. Brignell, "The future of intelligent sensors: A problem of technology or ethics?," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 56, no. 1-2, pp. 11-15, 1996.
- [3] H. Schödel, "Utilization of fuzzy techniques in intelligent sensors," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 63, no. 3, pp. 271-292, 1994.
- [4] C.-T. Kone, "Conception de l'architecture d'un réseau de capteurs sans fil de grande dimension," Université Henri Poincaré-Nancy I, 2011.
- [5] M. Lehsaini, "Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs: application à la domotique," Besançon, 2009.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, 2002.
- [7] S. MOAD, "Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil" *Master recherche en 2ème année informatique*, vol. Université : FSIC-Rennes 1, Laboratoire de recherche : DYONISOS-IRISA, 2008
- [8] R. Kacimi, "Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil," 2009.
- [9] O. Boudaa, "Conception et réalisation d'un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil," Université A/Mira de Bejaia, 2015.
- [10] A. Mehiaoui, "Etude comparative entre les deux protocoles de routage LEACH et PEGASIS dans les réseaux de capteurs sans fil."
- [11] M. Ilyas and I. Mahgoub, *Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems*. CRC press, 2004.
- [12] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks," in *ipdps*, 2002, p. 0195b: Citeseer.
- [13] K. M. Modieginyane, B. B. Letswamotse, R. Malekian, and A. M. Abu-Mahfouz, "Software defined wireless sensor networks application opportunities for efficient network management: A survey," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 66, pp. 274-287, 2018.
- [14] H. Wu and M. Shahidehpour, "Applications of wireless sensor networks for area coverage in microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 1590-1598, 2018.
- [15] L. Iannone, F. Benbadis, M. D. de Amorim, and S. Fdida, "Some applications of wireless sensor networks," in *Journées Scientifiques Techniques CetMef (Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales)*, 2004, pp. 239-247.
- [16] H. Karl and A. Willig, *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2007.



- [17] T. Allik, H. Makhlof, and N. Koulalene, "Mise en place d'un réseau de capteurs sans fil pour la surveillance des paramètres de production de l'unité de conditionnement d'huile au sein de Cévital," Université abderrahmane mira béjaia, 2017.
- [18] Y. Yousef, "Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil," Mulhouse, 2010.
- [19] L. J. Zhong J, "Cognitive radio cognitive network simulator," *Michigan Tech University*, 2009.
- [20] J. Wang, M. Ghosh, and K. Challapali, "Emerging cognitive radio applications: A survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 3, pp. 74-81, 2011.
- [21] C. PRODHON, "LE PROBLÈME DE LOCALISATION-ROUTAGE," 2006.
- [22] A. Awasthi, "Développement d'un système de routage hiérarchique pour les réseaux urbains," Université de Metz, 2004.
- [23] O. Younis and S. Fahmy, "HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks," *IEEE Transactions on mobile computing*, no. 4, pp. 366-379, 2004.
- [24] H. Balakrishnan, A. P. Chandrakasan, and W. B. Heinzelman, "Method for low-energy adaptive clustering hierarchy," ed: Google Patents, 2006.
- [25] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems," in *Proceedings, IEEE aerospace conference*, 2002, vol. 3, pp. 3-3: IEEE.
- [26] S. K. P. Sasikumar, "K-means clustering in wireless sensor networks," in *Proceedings of 4th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, pp. 140-144, 2012.
- [27] A. Gachhadar and O. N. Acharya, "K-means based energy aware clustering algorithm in wireless sensor network," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 5, no. 5, pp. 156-161, 2014.
- [28] A. Mahboub, M. Arioua, and E. M. En-Naimi, "Energy-Efficient Hybrid K-Means Algorithm for Clustered Wireless Sensor Networks," *International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708)*, vol. 7, no. 4, 2017.
- [29] R. Guigourès, "Utilisation des modèles de co-clustering pour l'analyse exploratoire des données," Université Panthéon-Sorbonne-Paris I, 2013.
- [30] E. G. N. Gast, "k-Moyennes," *Cours L3 math/info*.
- [31] D. Arthur and S. Vassilvitskii, "k-means++: The advantages of careful seeding (Tech. Rep.)," ed: Stanford, CA: Stanford InfoLabo, 2006.
- [32] A. Chaturvedi, P. E. Green, and J. D. Carroll, "K-modes clustering," *Journal of classification*, vol. 18, no. 1, pp. 35-55, 2001.
- [33] F. Xiangning and S. Yulin, "Improvement on LEACH protocol of wireless sensor network," in *2007 International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2007)*, 2007, pp. 260-264: IEEE.

- [34] Y. Lei, F. Shang, Z. Long, and Y. Ren, "An energy efficient multiple-hop routing protocol for wireless sensor networks," in *2008 First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, 2008, pp. 147-150: IEEE.
- [35] J. MacQueen, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," in *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, 1967, vol. 1, no. 14, pp. 281-297: Oakland, CA, USA.
- [36] L. Kaufman and P. J. Rousseeuw, *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis*. John Wiley & Sons, 2009.
- [37] G. F. Riley and T. R. Henderson, "The ns-3 network simulator," in *Modeling and tools for network simulation*: Springer, 2010, pp. 15-34.
- [38] B. L. Titzer, "Avrora: The AVR simulation and analysis framework," University of California, Los Angeles, 2004.
- [39] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *IEEE Transactions on wireless communications*, vol. 1, no. 4, pp. 660-670, 2002.

## Résumé

L'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans plusieurs domaines a poussé les chercheurs à proposer des protocoles de routage économes en énergie pour garantir une longue longévité des réseaux vu que ces derniers sont considérés comme des réseaux présentant une certaine autonomie en termes d'énergie.

Dans ce travail, nous avons proposé un nouveau schéma de routage basé sur l'approche de clustering. Ce protocole permet d'organiser le réseau en clusters en tenant compte de la distance entre les nœuds et utilise un schéma de routage basé sur une approche gloutonne améliorée (Greedy Forwarding) pour acheminer les données d'un nœud source à la station de base. Ce schéma de routage permet d'établir des chemins de clusterhead à clusterhead (CH-to-CH) jusqu'à l'aboutissement à la station de base ce qui réduit la consommation d'énergie et par conséquent augmente la durée de vie du réseau.

**Mots Clés :** Clustering, Greedy Forwarding, K-means, Réseaux de capteurs, Routage

## Abstract

The use of wireless sensor networks in several areas has prompted researchers to propose energy-efficient routing protocols to ensure long network lifetime as the networks are considered energy-autonomy networks.

In this work, we proposed a new routing scheme based on the clustering approach. This protocol organizes the network into clusters by considering the distance between the nodes and uses a routing scheme based on an improved greedy approach (Greedy Forwarding) to route data from a source node to the base station. This routing scheme establishes paths from clusterhead to clusterhead (CH-to-CH) until the base station, which reduces energy consumption and therefore increases network lifetime.

**Keywords:** Clustering, Greedy Forwarding, K-means, Wireless Sensor Networks, Routing.

## ملخص

دفع استخدام شبكات الاستشعار اللاسلكية في العديد من المناطق الباحثين إلى اقتراح بروتوكولات توجيه موفرة للطاقة لضمان عمر افتراضي طويل للشبكة لأن الشبكات تعتبر شبكات مستقلة للطاقة. في هذا العمل ، اقترحنا خطة توجيه جديدة تستند إلى نهج التجميع. ينظم هذا البروتوكول الشبكة في مجموعات عن طريق النظر في المسافة بين العقد ويستخدم نظام توجيه يستند إلى نهج التجميع المحسن (توجيه الجشع) لتوجيه البيانات من عقدة مصدر إلى المحطة الأساسية. يحدد نظام التوجيه هذا مسارات من الكتلة إلى رأس الكتلة (CH-to-CH) حتى المحطة الأساسية ، مما يقلل من استهلاك الطاقة وبالتالي يزيد من عمر الشبكة.

**الكلمات المفتاحية:** التجميع ، Greedy Forwarding ، K-means ، شبكات الاستشعار اللاسلكية، التوجيه