



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université AMO de Bouira

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département d'Informatique

Mémoire de Master

en Informatique

Spécialité : Génie des Systèmes Informatiques (GSI)

Thème

Dual cluster-head protocol for energy harvesting WSNs
using machine learning

Encadré par

— OUKAS NOUREDDINE

Réalisé par

— LOUNIS TAREK

— TELLAB MOHAMED ELAMINE

2021/2022

Remerciements

*Tout d'abord et avant tout, nous remercions **ALLAH**, le tout-puissant de nous avoir donné la patience, la santé et la volonté pour réaliser ce mémoire.*

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements et le grand respect à notre encadreur, Mr. OUKAS Noureddine, pour sa disponibilité, ses conseils, sa gentillesse et toute l'aide qu'il nous ont rapportés.

Un grand merci à nos chers parents et nos familles qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté à participer à l'évaluation de notre travail.

Nous adressons toutes sympathie à tous nos collègues et nos amis pour leurs encouragements et pour tous les moments agréables qu'on passés ensemble.

Finalement, nous aimerions aussi remercier tous ceux qui nos ont encouragé et supporté avec les hauts et les bas tout au long de ce travail. Merci à tous et toutes.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail :

À Mes très chers parents et frères, qui m'ont soutenu, encouragé pour que je puisse mener à bien mes études, et qui attendu ce jour avec impatience.

À mon binôme Lounis Tarek ;

À toute ma famille, à tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

À chers amis : Sami, Amar, Zakaria, Sofian, Fateh, Abed elnour, Aymen...

À tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et universitaire.

Tellab Mohammed Elamine.

Dédicaces

pour que ma réussite soit complète je la partage avec tous les personnes que j'aime, je dédié ce modeste travail :

À mes très chers parents, qui m'ont soutenu, encouragé pour que je puisse mener à bien mes études, et qui attendu ce jour avec impatience.

À tous mes frères, mes sœurs et toute ma famille, en témoignage de mon profond respect.

À mon binôme Amine.

À tous mes amis sans exception, Sami, Amine, Lakhdar, Amar, Zakaria, Yasser, Abdelhak, Khalil, Oussama...

À tous mes collègues que j'ai partagés avec eux mes bons moments tout au long de mes études.

Lounis Tarek.

Résumé

Le réseau de capteurs sans fil se compose d'un grand nombre de petits nœuds de capteurs avec des ressources énergétiques limitées, il s'agit d'ensembles d'unités électroniques miniaturisées capables de mesurer certains phénomènes physiques dans l'environnement où ils sont déployés. La consommation d'énergie est l'un des problèmes que l'on peut rencontrer dans ce type de réseau. Par conséquent, la recherche se concentre sur l'amélioration de la gestion de l'énergie consommée par les capteurs de réseau. À cette fin, nous avons proposé une nouvelle approche basée sur la classification avec k-means. L'approche proposée est basée sur la sélection de deux chefs pour chaque cluster. La simulation à l'aide de NS3 a prouvé la supériorité de l'approche proposée par rapport au protocole leach et k-means-leach.

Mots clés : Réseau de capteurs sans fil, Consommation d'énergie, Double chef de cluster, k-means, Leach, NS-3.

Abstract

The wireless sensor network consists of a large number of small sensor nodes with limited energy resources, these are sets of miniaturized electronic units capable of measuring certain physical phenomena in the environment where they are deployed. Energy consumption is one of the problems that can be encountered in this type of network. Therefore, research focuses on improving the management of energy consumed by network sensors. To this end, we have proposed a new approach based on clustering with k-means. The proposed approach is based on the selection of dual cluster-head. Simulation using NS3 proved the superiority of the proposed approach over leach and k-means-leach protocol.

Keywords : Wireless sensor network, Energy consumption, Dual cluster-head, k-means, Leach, NS-3.

الملخص :

تتكون شبكة المستشعرات اللاسلكية RCSF من عدد كبير من عقد الاستشعار الصغيرة ذات موارد الطاقة المحدودة ، وهي مجموعات من الوحدات الإلكترونية المصغرة القادرة على قياس ظواهر فيزيائية معينة في البيئة التي يتم نشرها فيها. استهلاك الطاقة أحد المشكلات التي يمكن مواجهتها في هذا النوع من الشبكات. لذلك ، يركز هذا البحث على تحسين إدارة الطاقة التي تستهلكها مستشعرات الشبكة. تحقيقاً لهذه الغاية ، اقترحنا نهجاً جديداً يعتمد على التصنيف بخوارزمية K-MEANS . يعتمد النهج المقترح على اختيار قائدين لكل مجموعة. أثبتت المحاكاة باستخدام NS-3 تفوق النهج المقترح على بروتوكول LEACH و K-MEANS-LEACH .

الكلمات المفتاحية : شبكة الاستشعار اللاسلكية ، استهلاك الطاقة ، مجموعات برئيسين ،

NS-3 ، LEACH ، K-MEANS

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Liste des abréviations	vi
Introduction générale	1
1 Les réseaux de capteurs sans fil	3
1.1 Introduction	3
1.2 Histoire des réseaux de capteurs sans fil	3
1.3 Définition d'un RCSF	4
1.4 Les éléments constitutifs d'un RCSF	4
1.5 Architecture d'un nœud de capteur	5
1.6 Les domaines d'applications des réseaux de capteurs	6
1.6.1 Applications militaires	6
1.6.2 Applications médicales	7
1.6.3 Applications commerciales	8
1.6.4 Applications environnementales	9
1.7 Caractéristiques des réseaux de capteurs	9
1.8 La Pile de protocoles des RCSFs	10
1.9 Sources de surconsommation d'énergie dans les nœuds de capteurs	11
1.10 Techniques de Conservation d'énergie	12

1.11	Récupération de l'énergie	14
1.11.1	Énergie radiante	14
1.11.2	Énergie mécanique	15
1.11.3	Énergie thermique	15
1.11.4	Systèmes hybrides de récupération d'énergie	15
1.12	Les protocoles de routage	16
1.12.1	Routage plat	16
1.12.2	Routage hiérarchique	17
1.12.3	Routage géographique	18
1.13	Les technologies sans fil utilisées dans la communication inter-capteurs	18
1.14	Les Défis de RCSF	20
1.15	Conclusion	21
2	Clustering dans les réseaux de capteurs sans fil	22
2.1	Introduction	22
2.2	Clustering dans les RCSF	22
2.2.1	Les Objectifs de Clustering dans les RCSFs	24
2.2.2	Les défis des algorithmes de clustering dans les RCSFs	25
2.2.3	Les approches de base de Clustering	26
2.3	Protocole de routage LEACH (Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy)	27
2.3.1	Fonctionnement du protocole LEACH	28
2.3.2	Les avantages et les inconvénients de LEACH	29
2.4	Les algorithmes de clustering	31
2.4.1	L'algo de K-Means	31
2.4.2	L'algo de gaussian mixture model (GMM)	31
2.4.3	L'algo de Agglomerative Hierarchy clustering	32
2.4.4	L'algo de k-nearest neighbors (KNN)	33
2.4.5	Algorithme de DBSCAN	34
2.4.6	Comparaison de certains algorithmes de clustering	35
2.5	L'algorithme de K-means pour les RCSFs	35
2.5.1	Choix du nombre des clusters	36
2.5.2	Utilisation de K-means pour RCSFs	37
2.6	Conclusion	38

3 Clustering avec double chefs de groupe à l'aide de K-means pour les RCSFs	39
3.1 Introduction	39
3.1.1 Scenario de la solution	39
3.1.2 Motivations	40
3.2 Travaux connexes	41
3.3 Présentation de l'approche proposé (DCHRP)	45
3.3.1 L'algorithme proposé	50
3.3.2 Les avantages de l'algorithme proposé	50
3.3.3 Comparaison	51
3.4 Conclusion	51
4 Analyse expérimentale	52
4.1 Introduction	52
4.2 Environnements de travail	52
4.2.1 Environnement matériel	52
4.2.2 Environnement logiciel	52
4.2.3 Langages de programmation utilisés	53
4.3 Simulation et analyse des resultats	54
4.3.1 Les hypothèses et les paramètre de simulation	54
4.3.2 Les approches comparées	54
4.3.3 Critères de comparaison	54
4.3.4 Critères de performance	55
4.3.5 Comparaison et analyse des approches par le Critère 1	55
4.3.6 Comparaison et analyse des approches par le Critère 2	58
4.4 Conclusion	61
Conclusion générale	62
Bibliographie	63

Table des figures

1.1	Architecture standard d'un RCSF [1].	4
1.2	Architecture d'un nœud de capteur sans fil [2].	5
1.3	Exemple d'application militaire [3].	7
1.4	Ensemble de capteurs dans un corps humain [3].	8
1.5	Application environnementale des RCSF.	9
1.6	La Pile de protocoles de RCSF [4].	11
2.1	Communication de données dans une configuration hiérarchique[5].	24
2.2	Mécanisme de clustering du protocole LEACH [6].	27
2.3	Chronologie de fonctionnement de LEACH [7].	29
3.1	Architecture de l'approche proposée	40
3.2	Déploiement des nœuds dans une zone 200m x 200m.	47
3.3	Désignation des CHs primaires.	47
3.4	Choix des CHs et CHVs après l'itération finale.	48
3.5	Le schéma de fonctionnement de l'approche proposé	49
4.1	Test 01 : Nombre total de rounds vs l'énergie moyenne du réseau	56
4.2	Test 02 : Nombre total de rounds vs l'énergie moyenne du réseau	57
4.3	Test 03 : Nombre total de rounds vs l'énergie moyenne du réseau	57
4.4	Test 01 : Nombre total de rounds(%) vs le premier nœud qui morte	58
4.5	Test 02 : Nombre total de rounds(%) vs le premier nœud qui morte	59
4.6	Test 03 : Nombre total de rounds(%) vs le premier nœud qui morte	60

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre WiFi, Ble, Bluetooth et ZigBee [8].	20
2.1	Comparaison de certains algorithmes de clustering.	35
3.1	Comparaison entre certaines approches de clustering	51
4.1	Paramètres de simulation.	54
4.2	Comparaison d'énergie résiduelle pour les trois tests	56
4.3	Comparaison par le premier nœud qui morte pour les trois tests	58

Liste des abréviations

RCSF	Réseaux de Captures Sans Fil
GPS	Global Positioning System
MAC	Media Access Control
CPU	Central Processing Unit
CH	Cluster Head
RF	Radio Fréquence
TEG	Termoelectric Generator
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
BLE	Bluetooth Low Energy
BS	Station de Base
TDMA	Temporal Division Multiple Access
HEED	Hybrid Energy-Efficient Distributed
EEHC	Energy-Efficient Heterogeneous Cluster
GMM	Gaussian Mixture Model
KNN	K-Nearest Neighbors
DBSCAN	Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DCHRP	Dual Cluster Head Routing Protocol
CHV	Cluster Head Vice

Introduction générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont composés d'un grand nombre de nœuds, ils se distinguent par un déploiement dense et à grande échelle, ces nœuds sont placés dans une zone d'observation pour recueillir des données et les transmettre à une unité de traitement connue sous le nom de station de base. La capacité d'auto-organisation, la collaboration, le déploiement rapide et bas prix sont les qualités les plus remarquables de ces nœuds.

Les réseaux de capteurs ont connu beaucoup de succès en termes de domaines d'application, car ils ont le potentiel de révolutionner de nombreux secteurs de notre économie et de notre vie quotidienne, y compris la surveillance et la préservation de l'environnement, le transport et l'automatisation du secteur de la santé, modernisation de la médecine, de l'agriculture, services militaires et autres.

Problématique :

L'un des plus grands défis pour les RCSFs est de maintenir les mêmes performances lors de la mise à l'échelle, de la consommation d'énergie et surtout de la durée de vie du réseau, car les capteurs sont généralement équipés de petites batteries et sont presque impossibles à remplacer lorsqu'ils sont déployés dans des zones hostiles. Ces défis ont ouvert la voie au développement de nouveaux protocoles de routage.

Objectif :

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous proposons une nouvelle approche qui permet de relever ces défis. Cette approche proposée est basée sur le clustering pour

organiser le réseau sous forme d'un système de routage multi-sauts avec double chefs de cluster pour acheminer les données vers la station de base, afin de réduire la consommation d'énergie et ainsi augmenter la durée de vie du réseau.

Organisation du mémoire :

Le premier chapitre présente quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil.

Le deuxième chapitre présente Clustering dans les réseaux de capteurs sans fil.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de notre amélioration proposé.

Le quatrième chapitre présente les résultats de l'évaluation de performance de notre amélioration proposée après simulation.

Nous clôturons notre document par une conclusion générale.

Les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les concepts liés à notre champ d'application avant de commencer la construction de notre système. Le concept et les propriétés des réseaux de capteurs sans fil seront discutées dans ce chapitre (RCSFs ou WSNs : Wireless sensor networks). Ces réseaux sont devenus plus répandus dans divers domaines d'application tels que l'industrie, la médecine, le commerciale et le militaire.

1.2 Histoire des réseaux de capteurs sans fil

Bien qu'il y ait eu un regain d'intérêt et d'étude dans les RCSFs ces dernières années, l'utilisation de capteurs pour des services spécialisés n'est pas nouvelle. Pendant la guerre froide, le Sound Surveillance System, qui utilisait des capteurs acoustiques, a été utilisé pour identifier les sous-marins soviétiques silencieux. La Nationale Oceanographic and Atmospheric Administration utilise actuellement ces technologies pour surveiller les phénomènes océaniques. L'Advanced Research Project Agency, créée par la DARPA des États-Unis en 1969 et qui a servi de banc d'essai pour les nouvelles technologies de mise en réseau reliant de nombreuses universités et institutions de recherche, a été le précurseur de l'internet. Le RCSF peut être retracé à la défense Advanced Research Projects Agency Distributed Sensor Networks programme, qui a commencé en 1980 (DARPA) [9].

1.3 Définition d'un RCSF

Un réseau de capteurs sans fil peut être caractérisé comme un réseau de nœuds qui peuvent détecter des incidents de l'environnement et transférer l'information reçue du champ surveillé (p. ex., une zone ou un volume) au moyen de connexions sans fil [10]. Les données sont transmises à une station de base (aussi appelé puits ou sink) qui peut les utiliser localement ou se connecter à d'autres réseaux (comme Internet) via une passerelle. Les nœuds peuvent être statiques ou mobiles. Ils peuvent être homogènes ou non homogènes. les nœuds transmettent les données recueillies à l'un des puits, qui les envoie ensuite à la passerelle, qui les envoie ensuite à l'utilisateur final. Du point de vue du protocole, cela signifie qu'un choix peut être fait en fonction d'un critère approprié, comme une latence minimale, un débit maximal, un nombre minimal de sauts, et ainsi de suite.

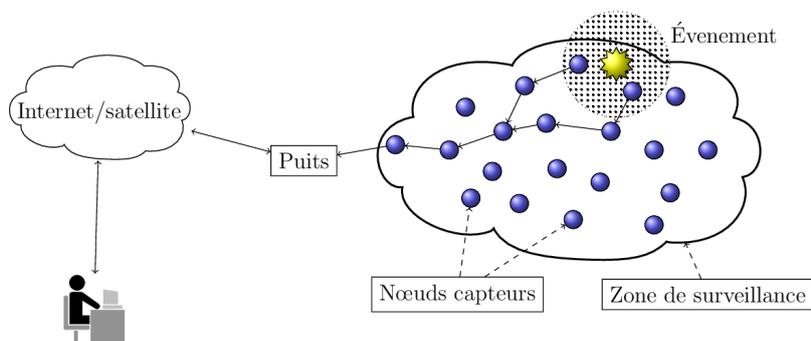


FIGURE 1.1 – Architecture standard d'un RCSF [1].

1.4 Les éléments constitutifs d'un RCSF

Un réseau de capteurs est souvent composé d'un grand nombre de nœuds qui sont soit mis dans une zone ou dispersés au hasard (souvent déployés par avion ou par hélicoptère). Cette dispersion aléatoire des capteurs nécessite la mise en œuvre d'algorithmes auto-organisés dans le protocole réseau de capteurs [11]. Plusieurs nœuds de capteurs, un nœud Sink et un centre de traitement des données constituent un réseau de capteurs sans fil.

- **Nœuds** : Ce sont des capteurs qui, en termes d'architecture et de dispersion géographique, répondent aux critères de l'application pour laquelle ils ont été construits.

- **Sink ou puits** : C'est un maillon crucial de la chaîne. Son travail diffère de celui des autres nœuds du réseau puisque son but est de recueillir des données des autres nœuds du réseau, c'est pourquoi il doit être constamment actif parce que la réception des données est aléatoire, et il doit avoir une quantité infinie d'énergie pour le faire.
- **Centre de traitement des données** : Toutes les données acquises par le sink seront transférées à ce centre, qui compilera et triera toutes les données afin de découvrir celles qui peuvent être exploitées.

1.5 Architecture d'un nœud de capteur

Un nœud de capteur est constitué de nombreux éléments ou modules, dont chacun est responsable d'une certaine fonction telle que la collecte, le traitement ou la transmission de données. Il a aussi une source d'énergie.

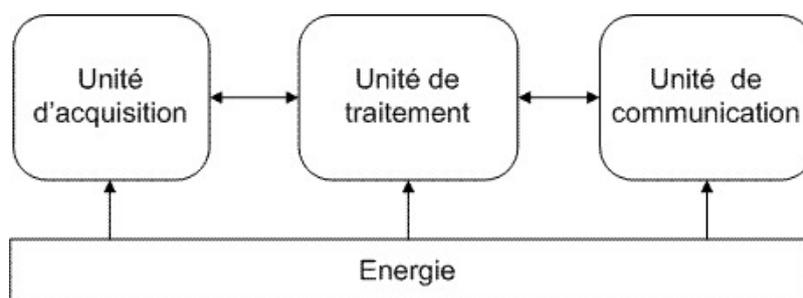


FIGURE 1.2 – Architecture d'un nœud de capteur sans fil [2].

- **L'unité d'acquisition de données** : le principe de fonctionnement des détecteurs est souvent le même : il s'agit de répondre à l'évolution des conditions environnementales en modifiant certaines caractéristiques électriques (par exemple, pour un thermistor, une variation de température entraîne une variation de résistance). Un convertisseur analogique-numérique convertit les variations de tension afin qu'elles puissent être traitées par l'unité de traitement. Les MEMS (microsystème électromécanique) sont des structures plus complexes qui permettent de détecter un large éventail de phénomènes physiques (accélération, concentration chimique, etc).
- **L'unité de traitement des données** : Il se compose de deux interfaces, l'une avec l'unité d'acquisition et l'autre avec l'unité de communication, et son devoir est de gérer le bon fonctionnement des autres unités, sur certains modèles, un système

d'exploitation nécessaire au fonctionnement du capteur peut y être installé. Cette unité permet l'exécution de procédures de communication qui permettent à un nœud de collaborer avec d'autres nœuds du réseau, elle permet également l'analyse des données recueillies afin de faciliter le travail du nœud sink.

- **L'unité de communication de données** : Parce qu'il est équipé d'un émetteur / récepteur, cet appareil permet toutes les communications entre les différents nœuds à avoir lieu sur un canal sans fil.
- **La batterie** : Il fournit de l'électricité aux appareils que nous avons décrits, cette batterie est définie impossible de la remplacer par une autre. Lors de la création de protocoles pour les réseaux de capteurs, la restriction fondamentale est la faible capacité énergétique du capteur. Des capteurs avec des composants supplémentaires, comme le système de positionnement mondial (GPS) [12], sont disponibles.

1.6 Les domaines d'applications des réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs envahissent une grande variété d'applications en raison de la taille de plus en plus petite des micro-capteurs, le coût plus bas et moins cher, la large gamme de types de capteurs accessibles (thermique, optique, vibration,...). Les réseaux de capteurs ont le potentiel de révolutionner la compréhension et la construction de systèmes physiques complexes. Lorsqu'il s'agit de recueillir et de traiter de l'information provenant de l'environnement, les réseaux de capteurs peuvent être très utiles dans diverses applications. Les domaines militaire, environnemental, national, de la santé et de la sécurité ne sont que quelques-uns des domaines où ces réseaux peuvent faire une différence. Voici quelques exemples d'utilisations possibles dans ces nombreux domaines :

1.6.1 Applications militaires

L'armée, comme beaucoup d'autres technologies, a été une force motrice derrière la création de réseaux de capteurs. Les réseaux de capteurs comprennent des propriétés telles que le déploiement rapide, le faible coût, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes qui en font un outil souhaitable dans ce domaine. Un réseau de capteurs installés sur un site

stratégique ou à accès difficile d'accès pour surveiller toutes les actions des forces ennemies ou pour étudier le terrain avant d'envoyer des soldats est un exemple d'application dans ce domaine (détection d'agents chimiques, biologiques ou radiologiques). L'armée américaine a déjà mené des expériences réussies dans ce lieu dans le désert de Californie.

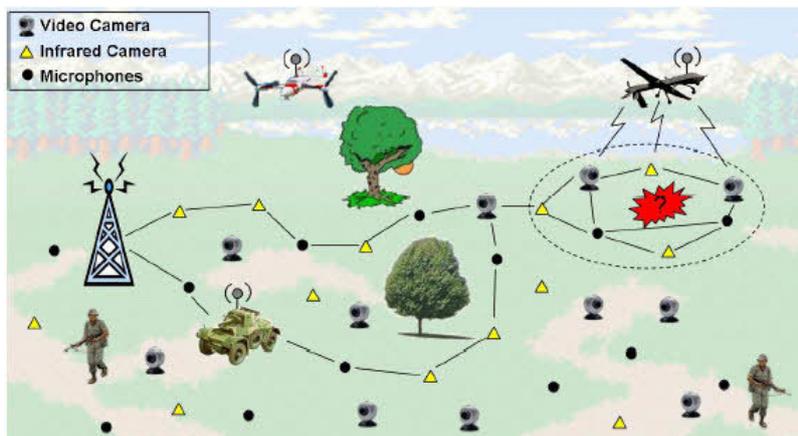


FIGURE 1.3 – Exemple d'application militaire [3].

1.6.2 Applications médicales

Des micro-capteurs qui pourraient être avalés ou implantés sous la peau pourraient être utilisés à l'avenir pour surveiller les fonctions critiques d'une personne. Des micro-caméras qui peuvent être avalées sont actuellement disponibles. Ils peuvent envoyer des photos de l'intérieur d'un corps humain pour un maximum de 24 heures sans chirurgie. Les capteurs qui agissent dans le corps humain pour traiter des maux spécifiques sont présentés par les auteurs d'une recherche récente. Pour fixer l'image, ils travaillent maintenant à créer une rétine artificielle composée de 100 micro sensors. D'autres utilisations biologiques ambitieuses sont également décrites, telles que la surveillance du glucose, la surveillance des organes essentiels et la détection du cancer. Dans le domaine de la médecine, le déploiement de réseaux de capteurs pourrait permettre une surveillance continue des patients ainsi que la collecte de données physiologiques de meilleure qualité, facilitant l'identification de certains troubles.

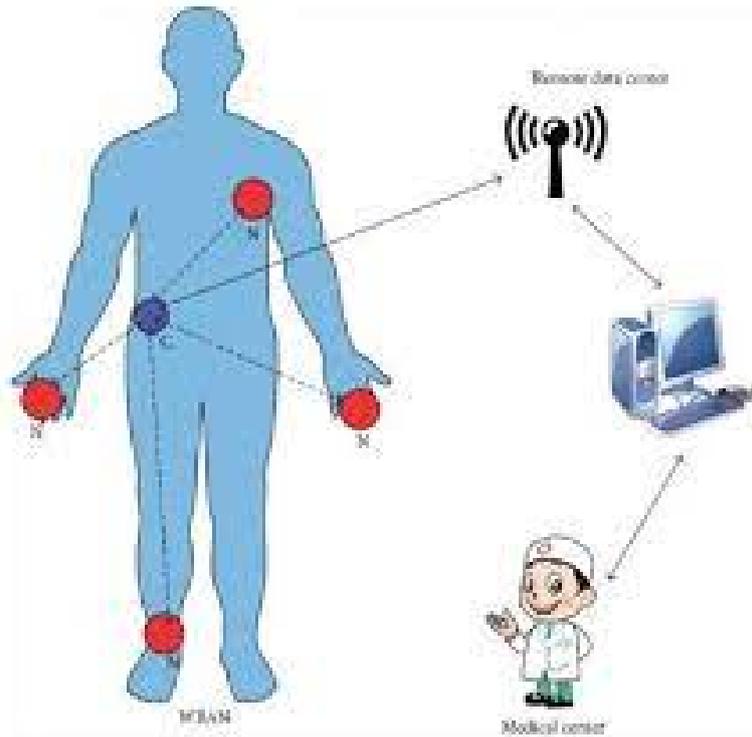


FIGURE 1.4 – Ensemble de capteurs dans un corps humain [3].

1.6.3 Applications commerciales

Les nœuds de capteurs peuvent être inclus dans le processus de stockage et de distribution. Le réseau qui en résulte peut être utilisé pour déterminer l'emplacement, l'état et la direction d'un colis ou d'un fret. Il est donc possible pour un client qui attend un produit de recevoir un avis de livraison en temps réel et de connaître l'emplacement actuel du colis. Les réseaux de capteurs permettront aux organisations industrielles de suivre le processus de production des matières premières aux produits finis. Les réseaux de capteurs peuvent aider les organisations à améliorer la qualité des services tout en réduisant les dépenses. Le système de climatisation d'un bâtiment peut être construit en incorporant plusieurs micro-capteurs dans les carreaux de sol et l'ameublement. Par conséquent, la climatisation ne peut être activée que dans les situations où les gens sont présents et seulement si elle est vraiment essentielle. Le système distribué sera également en mesure de maintenir les chambres à une température constante. Si elle est mise en œuvre à grande échelle, cette application pourrait réduire la demande mondiale d'énergie [13].

1.6.4 Applications environnementales

Les thermo-capteurs dispersés à partir d'un aéronef au-dessus d'une forêt peuvent détecter l'apparition d'un feu de forêt dans le champ de captage, ce qui permet d'accroître l'efficacité de la lutte contre les incendies de forêt. Les capteurs peuvent être semés avec des semences dans les champs agricoles. En conséquence, les régions sèches seront plus faciles à voir et l'irrigation sera plus efficace. Des capteurs peuvent être installés sur les sites industriels, les centrales nucléaires et les pétroliers pour détecter les fuites de produits dangereux (gaz, produits chimiques, matières radioactives, pétrole, etc.) et informer les utilisateurs à temps pour permettre une action efficace. En forêt ou dans une aire de conservation de la faune, un grand nombre de capteurs peuvent être installés pour recueillir diverses données sur l'état de l'environnement naturel et les tendances des déplacements. L'Université de Pise en Italie, par exemple, a créé des réseaux de capteurs pour la gestion des parcs (incendies, animaux, etc.) [14].

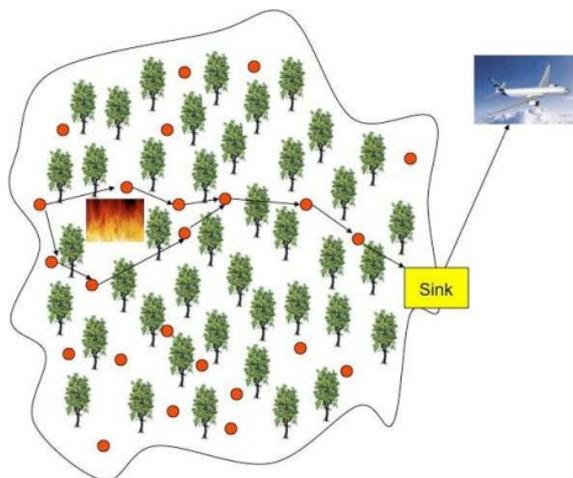


FIGURE 1.5 – Application environnementale des RCSF.

Il est donc possible d'observer des espèces animales difficiles à étudier dans leur habitat naturel sans les perturber, et d'offrir des méthodes plus efficaces de conservation de la faune.

1.7 Caractéristiques des réseaux de capteurs

Les principales caractéristiques [4] du RCSF sont :

- **Scalabilité** : Le besoin d'avoir un grand nombre de nœuds, qui peuvent parfois

dépasser des millions, pour améliorer la granularité du suivi et la flexibilité de remplacement en cas de défaillance.

- **Caractéristiques du trafic interrompu** : La connectivité sans fil est perturbée en raison du brouillage inévitable à l'intérieur d'un RCSF.
- **Réseaux multiservices** : En raison des contraintes de ressources physiques imposées par la réduction des composantes électroniques.
- **Réduction de la consommation d'énergie** : Les capteurs d'un RCSF sont alimentés par des batteries qui ne peuvent pas être remplacées en raison de conditions hexogènes, ce qui limite la gestion de l'énergie (sachant que le chargement des batteries est très coûteux et donc très peu économique d'un point de vue économique).
- **Déploiements de différents types** : Résultats divers selon le déploiement : Lorsqu'ils sont déployés en plein air, les intrus ou les nœuds capturés entraînent un manque de sécurité physique. Le déploiement aléatoire nécessite une topologie préconfigurée et des algorithmes auto-organisés.

1.8 La Pile de protocoles des RCSFs

Les RCSF nécessitent une pile de protocoles qui prend en charge leurs caractéristiques uniques. La pile de protocoles du réseau de capteurs, selon (Akyildiz et al. 2002)[15], est similaire à la pile de protocoles standard, avec les couches suivantes : application, transport, réseau, liaison de données et physique. La sélection de fréquence, la production de fréquence porteuse, la détection de signal et la modulation des données sont tous gérés par la couche physique. Le multiplexage des flux de données, la détection des trames de données, l'accès au support et la correction des erreurs sont tous gérés par la couche liaison de données. Dans un réseau de communication, il permet des connexions point à point et point à multipoint fiables. Les données fournies par la couche transport sont acheminées par la couche réseau. Dans les RCSF, la conception de la couche réseau doit tenir compte de l'efficacité énergétique, de la communication centrée sur les données, de l'agrégation des données et d'autres facteurs. La couche de transport aide à la maintenance des données et peut être nécessaire si les RCSF doivent être accessibles via Internet ou d'autres réseaux externes. Différentes formes de logiciels d'application peuvent être configurées et utilisées sur la couche d'application en fonction des fonctions de détection. La figure 1.6 illustre la

pile de protocoles et les plans d'accompagnement utilisés par le récepteur, la cluster head et les nœuds de capteur.

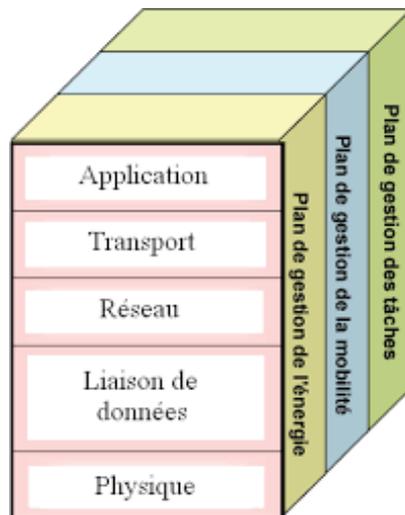


FIGURE 1.6 – La Pile de protocoles de RCSF [4].

le plan de gestion d'énergie est chargée de réduire la consommation d'énergie et, dans certains cas, de désactiver les fonctionnalités pour économiser de l'énergie. Le plan de gestion de la mobilité surveille et enregistre le mouvement des nœuds pour s'assurer qu'un chemin de données vers le puits est toujours disponible. Le plan de gestion des tâches équilibre et planifie les tâches de détection allouées au champ de détection, permettant aux nœuds restants de se concentrer sur le routage et l'agrégation de données tandis que le reste est chargé des activités de détection.

1.9 Sources de surconsommation d'énergie dans les nœuds de capteurs

Toute utilisation inutile de l'énergie qui peut être évitée afin d'économiser l'énergie d'un nœud de capteur est appelée surconsommation d'énergie. Les origines de cette surconsommation sont diverses, et elles peuvent être créées lors de la détection lorsqu'elle est mal manipulée. La surconsommation affecte aussi la communication. En effet, cette dernière est sujette à un certain nombre de phénomènes qui gaspillent des quantités excessives d'énergie, notamment au niveau MAC :

- **Les collisions** : sont la principale source de perte d'énergie. Lorsque deux messages sont envoyés au même moment et entrent en collision, elles deviennent inopérantes

et doivent être jetées. Il faut de l'énergie pour les retransmettre par la suite. À leur manière, tous les protocoles MAC tentent d'éviter les collisions [16].

- **L'écoute à vide (Idle listening)** : Le mode ralenti de certains types de radios consomme une quantité importante d'énergie. Éteindre la radio est une option, mais se déplacer entre les modes gaspille aussi de l'énergie, donc la fréquence de ces transitions doit être réduite au minimum [16].
- **L'écoute abusive (overhearing)** : quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés, c'est ce qu'on appelle l'écoute abusive. Lorsque la charge de trafic est élevée et que le nombre de nœuds est important, en particulier dans les réseaux principalement branchés, le coût de l'écoute clandestine peut être un élément dominant de la perte d'énergie [16].
- **Overmitting** : un nœud envoie des données et le nœud destinataire n'est pas prêt à les recevoir [16].
- **Over Head des paquets de contrôle** : Les paquets de contrôle réduisent le débit effectif utilisable puisqu'ils ne transmettent pas de données directement [16].

1.10 Techniques de Conservation d'énergie

Des essais expérimentaux ont révélé que le transfert de données consomme la plus grande énergie, alors que les calculs exigent relativement peu [17]. La consommation d'énergie du module capteur est déterminée par la spécificité du capteur. Dans de nombreuses circonstances, il est peu comparé à l'énergie requise par le traitement dans la communication. Dans certaines circonstances, l'énergie dépensée pour la détection est égale ou supérieure à l'énergie nécessaire à la transmission des données. La partie réseau (c'est-à-dire la gestion de l'énergie est prise en compte dans les opérations de chaque nœud, ainsi que dans la conception des protocoles réseau) et la partie détection (c.-à-d. que la gestion de l'énergie est prise en compte dans les opérations de chaque nœud, ainsi que dans la conception des protocoles de réseau) sont les deux parties des techniques d'économie d'énergie en général. En combinant plusieurs stratégies, la durée de vie d'un réseau de capteurs peut être prolongée [18]. Les protocoles écoénergétiques, par exemple, visent à réduire la consommation d'énergie pendant le fonctionnement du réseau. Même si les composants d'un nœud (CPU, radio, etc.) sont inactifs, ils nécessitent une quantité

importante d'énergie. Lorsque les composants du nœud ne sont pas utilisés, une stratégie de gestion de l'énergie peut être utilisée pour les désactiver temporairement et les techniques de conservation d'énergie les plus importantes sont :

- **Clustering** : L'organisation des réseaux de capteurs en structures groupées a récemment reçu beaucoup d'attention. Le clustering est une méthode populaire pour créer des réseaux de capteurs distribués écoénergétiques, fiables et évolutifs. Le regroupement réduit les frais généraux de communication et la consommation d'énergie. La fusion des données et l'agrégation des données des capteurs aux clusters head peuvent réduire considérablement la quantité de données livrées à la station de base. Chaque cluster a une cluster head et des nœuds membres dans une structure à deux niveaux. La couche supérieure est composée de clusters head, tandis que la couche inférieure est composée de nœuds membres. Les nœuds membres soumettent leurs données à leurs CH respectifs, qui les fusionnent et les transfèrent à la base centrale via d'autres CH. Parce que les données sont envoyées sur de plus grandes distances, les CHs perdent souvent plus d'énergie que les nœuds membres. Non seulement le clustering économise de l'énergie, mais il minimise également la contention des canaux et les collisions de paquets [19].
- **Duty cycling** : Parce que les nœuds ne sont actifs que lorsqu'il y a une activité réseau, l'approche du Duty cycling réduit considérablement la consommation d'énergie des capteurs. Pour maintenir la connexion, le Duty cycling peut être effectué en utilisant la redondance des nœuds et en sélectionnant seulement une petite partie des nœuds pour rester actif. La méthode de contrôle topologique peut aider à déterminer la meilleure sélection de nœuds pour assurer la connexion. Les capteurs peuvent s'endormir lorsqu'ils ne sont pas utilisés, car l'écoute au ralenti consomme une grande quantité d'énergie, ce qui équivaut à la transmission, à la décharge non linéaire et au déploiement redondant des capteurs. Par conséquent, les algorithmes de regroupement devraient tenir compte du cycle de service du nœud. Permettre aux nœuds non CH de dormir s'ils ne détectent pas ou n'interagissent pas avec leurs CH. Cette approche convient aux situations où les capteurs fournissent des données de façon régulière. Lorsque les capteurs reçoivent l'instruction de surveiller continuellement les éléments non intentionnels, un CH peut déterminer lesquels de ses membres sont redondants et les encourager à dormir [19].

1.11 Récupération de l'énergie

Les technologies de collecte d'énergie ont considérablement progressé en termes d'efficacité au cours des dernières années, et des systèmes pouvant fournir une production d'énergie continue à partir de diverses sources d'énergie telles que l'énergie solaire et les vibrations ont été créés [20]. En outre, les appareils RCSFs contemporains sont conçus pour être économes en énergie, leur permettant de fonctionner en utilisant l'énergie recueillie limitée pendant une très longue période de temps sans s'arrêter, du moins pas en raison de l'épuisement de l'énergie. Le nœud de capteur peut capturer et convertir une variété de sources d'énergie naturelles et artificielles en énergie électrique et chaque source d'énergie a une densité de puissance variée. Dans les sous-sections suivantes, nous décrivons les différents types d'énergie qui peuvent être obtenus à partir de sources radiantes (p. ex., énergie solaire et ondes radioélectriques), de sources mécaniques (p. ex., vibrations, vent, mouvement du corps humain et écoulement de l'eau) et de sources thermiques (p. ex., différence de température entre deux matériaux conducteurs, chaleur externe et sources de frottement).

1.11.1 Énergie radiante

L'énergie radiante est émise par le soleil et les ondes radioélectriques. La collecte d'énergie à partir des radiofréquences et de la lumière solaire a été largement étudiée ces dernières années dans le but d'utiliser cette source d'énergie pour alimenter les réseaux de capteurs sans fil pour des applications de surveillance environnementale [21].

- **Les rectennas d'énergie radio fréquence (RF) (ou antennes de rectification)** sont utilisés dans la collecte d'énergie RF pour capter les signaux électromagnétiques émis par des sources proches telles que les téléphones portables ou les stations radio, qui sont ensuite convertis en courant continu régulé à l'aide d'un circuit redresseur et utilisés par de petits systèmes de faible puissance comme les capteurs [22].
- **L'énergie solaire** est une ressource renouvelable. Il existe deux méthodes principales pour convertir la lumière du soleil en énergie utilisable : (1) la conversion thermique, qui consiste à chauffer un milieu qui passe par un générateur à turbine, et (2) la conversion photovoltaïque, qui consiste à convertir directement la lumière

en électricité sans utiliser de pièces mobiles ou d'étapes de conversion d'énergie intermédiaire [23].

1.11.2 Énergie mécanique

Les oscillations ou vibrations mécaniques sont un autre type d'énergie qui peut être utilisé pour alimenter les capteurs. L'énergie mécanique est généralement recueillie à l'aide de dispositifs piézoélectriques [24]. Les dispositifs piézoélectriques de récolte d'énergie sont connus pour produire de l'énergie à des tensions plus élevées sans avoir besoin d'une source de tension externe en raison des caractéristiques des matériaux piézoélectriques.

1.11.3 Énergie thermique

La collecte d'énergie thermique est fondée sur la notion qu'un courant électrique est créé lorsque deux matériaux conducteurs ont une différence de température.

L'efficacité des matériaux thermoélectriques influe sur le déploiement des récolteuses d'énergie thermique dans les RCSF [25]. Parce que les tensions et les niveaux de puissance des thermocouples individuels sont si faibles, plusieurs configurations de thermocouples sont nécessaires pour améliorer la tension de sortie et les niveaux de puissance de la moissonneuse d'énergie thermique. Par contre, les moissonneuses d'énergie thermique conviennent mieux à la production d'électricité à grande échelle, comme les turbines à vapeur [25].

1.11.4 Systèmes hybrides de récupération d'énergie

Quelques chercheurs ont proposé des systèmes hybrides de récolte d'énergie qui combinent plusieurs types de récolteuses d'énergie en un seul système. Dans cette section, nous examinons certains de ces systèmes hybrides existants de récolte d'énergie.

- **Systèmes solaires/thermiques** Li , al et Yu , al [26]. ils ont présenté un système hybride solaire/thermique pour les nœuds de capteurs sans fil autonomes. Un panneau solaire et un TEG servent de convertisseurs d'énergie, et le système comprend également une batterie Li-ion et un super-condensateur pour le stockage de l'énergie, ainsi qu'un sous-système de gestion de l'énergie. Le système suggéré a fait l'objet d'essais expérimentaux et a démontré qu'il offrait un soutien continu

de fonctionnement des nœuds pendant plus de 5 ans dans des conditions normales, alors qu'il ne pouvait fonctionner que 7 jours dans l'obscurité ou sous la pluie.

- **Systèmes solaires/thermiques/électromagnétiques** Virili et al [27]. ils ont conçu et construit un dispositif hybride de captage électromagnétique/thermique. Le système se compose d'une antenne de raccordement quart d'onde qui fonctionne dans la bande de fréquence ISM de 2,4 à 2,48 GHz et prend en charge un générateur thermoélectrique (TEG) sur elle. En plus de recueillir l'énergie électromagnétique de l'antenne, le côté supérieur du TEG se réchauffe lorsque les rayons du soleil l'atteignent, tandis que le côté froid reste à température ambiante.

1.12 Les protocoles de routage

Il y a trois types de protocoles de routage propres au RCSF : routage plat, routage hiérarchique et routage géographique.

1.12.1 Routage plat

Le routage plat assigne la même tâche à chaque nœud, et les nœuds de capteurs travaillent ensemble pour atteindre l'objectif global du réseau. En raison du grand nombre de nœuds de capteurs, il n'est pas possible d'attribuer une identification globale à chaque nœud. Il en est résulté un routage centré sur les données, dans lequel la station de base envoie des requêtes à des régions spécifiques du réseau et attend les réponses des nœuds de capteurs dans ces zones. Étant donné que les données sont demandées au moyen de requêtes, les attributs doivent être désignés pour refléter les qualités des données, comme les protocoles énumérés ci-dessous [28] :

- **SPIN** : Le concept SPIN consiste à nommer les données à l'aide de descripteurs de haut niveau ou de métas prédéfinis. Les métadonnées sont communiquées entre les capteurs via un mécanisme de publicité de données avant la transmission. Chaque nœud qui reçoit des données fraîches diffuse l'information à ses voisins, et ceux qui sont intéressés peuvent obtenir l'information en émettant une demande.
- **Diffusion dirigé** : Ce protocole utilise également un schéma de nommage par paire. Un gradient est créé et diffusé dans le voisinage immédiat par chaque nœud qui reconnaît un événement. La station de base, d'autre part, diffuse ses requêtes

sous forme d'intérêt à tous les nœuds dans la région immédiate, et chaque nœud recevant l'intérêt établit un gradient au nœud source de l'intérêt. De multiples routes de la station de base à la source de données sont créées de cette manière, avec le chemin optimal étant renforcé pour éliminer la redondance.

1.12.2 Routage hiérarchique

Les solutions de routage hiérarchiques offrent des avantages uniques en termes d'évolutivité et d'efficacité de communication. Pour réaliser des itinéraires économes en énergie. Les nœuds à haute énergie peuvent traiter et transmettre des informations dans une conception hiérarchique, tandis que les nœuds à basse énergie peuvent capter près de la destination. L'établissement de groupes et l'attribution de tâches spécifiques aux chefs de groupes peuvent améliorer considérablement l'évolutivité, ainsi que la durée de vie globale du système et l'efficacité énergétique. En effectuant l'agrégation et la fusion de données pour limiter la quantité de messages diffusés à la station de base, le routage hiérarchique est une technique efficace pour réduire la consommation d'énergie dans un cluster, comme les protocoles énumérés ci-dessous :

- **LEACH (Low-energy adaptive clustering hierarchy)** : Le protocole de routage hiérarchique le plus utilisé est LEACH. L'avantage principal est que la consommation d'énergie des éléments du réseau est réduite. Le réseau est organisé en grappes dans le cadre de ce protocole, et chaque clusters a un nœud maître chef de clusters. Ce dernier aide à la gestion des clusters. Il est choisi parmi les nœuds du cluster sur une base régulière, en fonction de l'état de sa batterie [29].
- **PEGASIS (Power-efficient gathering in sensor information systems)** : PEGASIS est considéré comme une amélioration de LEACH, qui a été introduit par Lindsey et al en 2002 ; il organise les nœuds de réseau dans une longue chaîne basée sur l'idée qu'un nœud peut seulement interagir avec le nœud le plus proche de lui. En conséquence, il adapte sa radio pour une conversation très brève afin d'économiser de l'énergie. Le processus de communication avec le puits est organisé en tours, chaque tour permettant à un seul nœud de parler directement avec le puits. Une meilleure conservation d'énergie est obtenue, Cette permission est accordée à chaque nœud réseau à tour de rôle. En regroupant les données sur chaque nœud réseau [29].

1.12.3 Routage géographique

Le routage géographique, contrairement aux techniques standard, offre des qualités intrigantes pour les réseaux de maillage sans fil spontanés : il ne nécessite aucune connaissance de la topologie globale puisqu'un nœud choisit le prochain saut parmi ses voisins en fonction de l'emplacement de la destination. En conséquence, parce qu'il n'utilise que des décisions locales, le système de routage permet l'évolutivité. Le routage géographique est facile car il n'a pas besoin de tables de routage, ce qui élimine le besoin de surcharge de contrôle tout en les créant et les maintenant. Rejoindre le réseau est tout aussi simple car un nouveau nœud nécessite simplement une adresse géographique. Ces adresses peuvent être collectées à l'aide d'un dispositif spécifique, tel qu'un GPS, ou en utilisant des techniques d'auto-localisation. Le protocole de routage géographique le plus connu est :

- **GAF (Geographic adaptive fidelity)** : Ce protocole, proposé par Y. Xu et al en 2001, divise le réseau en plusieurs zones virtuelles, chaque nœud étant attribué à une zone en fonction de ses coordonnées géographiques (à l'aide du GPS). Parce que les nœuds dans la même zone ont les mêmes coûts de routage, nous n'utilisons qu'un nœud de chaque zone pour acheminer les données, et les autres sont placés en mode veille pour économiser de l'énergie. La durée de vie du réseau est ainsi étendue proportionnellement au nombre total de nœuds inactifs.

1.13 Les technologies sans fil utilisées dans la communication inter-capteurs

1. **ZigBee** : ZigBee Alliance a développé un nouveau protocole sans fil standard ouvert. ZigBee est conçu pour les capteurs sans fil et les réseaux de contrôle à faible puissance, à faible coût et à faible débit de données. Il est simple à configurer et peut supporter jusqu'à 65000 nœuds en fonction des topologies utilisées [30].
2. **wifi** : est une technologie de réseau sans fil qui utilise la bande radio 2,4 GHz et est basé sur les normes IEEE 802.11. Il permet aux appareils électroniques d'échanger des données via un réseau comme Internet. WiFi est un réseau fiable, rentable et facilement évolutif. Selon les spécifications, les débits de transmission de données WiFi peuvent atteindre 300Mbps, avec un débit de 100 à 150Mbps. Il

offre également une grande zone de couverture.

3. **Bluetooth** : est une technologie de communication sans fil à courte portée conçue pour remplacer les câbles dans les réseaux personnels sans fil. Il est robuste, peu énergivore et peu coûteux. Créés à l'origine par Ericsson Microelectronics en 1994, ils sont désormais dirigés par un consortium comprenant Ericsson, Nokia, Toshiba, IBM et Intel. Le projet IEEE 802.15.1 est la norme IEEE Bluetooth , basée sur la fondation Bluetooth v 1.1 (Bluetooth TM, 2004). Parce que certaines de ses caractéristiques clés sont facultatives, il permet de différencier les produits. Il peut communiquer (transmettre et synchroniser des données) entre jusqu'à sept appareils utilisant les bandes radio 868 MHz, 915 MHz et 2,4 GHz à 1 GHz par seconde et jusqu'à une portée de 10 mètres [31]. Bluetooth ne prend en charge que la topologie en étoile, utilise un protocole MAC maître-esclave et utilise le duplexage temporel pour fournir une communication en duplex intégral.
4. **Bluetooth low energy (BLE)** : BLE Lancée en 2006 par Nokia, il s'agit d'une technologie de communication sans fil conçue pour une faible consommation d'énergie, une communication à courte portée et des appareils à faible coût , elle s'appelle Baby-Bluetooth et rebaptisée technologie Bluetooth Low Energy (BLE) [32]. BLE permet la communication entre de petits appareils alimentés par batterie et des appareils Bluetooth. Les petits appareils alimentés par batterie comprennent les montres, les claviers sans fil et les capteurs sportifs qui se connectent à des appareils hôtes tels qu'un ordinateur personnel ou des téléphones cellulaires. Cette norme fonctionne sur 2,4 GHz et a un débit de données de 1 Mbps, avec une distance de liaison de 5 à 10 m entre les appareils, BLE est incompatible avec le Bluetooth standard et les appareils BLE n'interagissent pas avec les produits Bluetooth classiques. Cependant, la mise en œuvre d'un dispositif bimode pourrait permettre une telle interopérabilité [32]. Le tableau 1.1 compare Bluetooth, BLE, wifi et ZigBee.

Caractéristiques	WiFi IEEE 802.11	Bluetooth IEEE 802.15.1	ZigBee IEEE 802.15.4	BLE
Application	Wireless LAN	Cable Replacement	Control and Monitor	Cable Replacement
Bandes de fréquence	2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz, 868MHz, 915MHz	2.4 GHz
Autonomie de la batterie	0.1-5 jours	1-7 jours	100-7,000 jours	1- 2 years
Nœuds par réseau	30	7	65,000	64,000
Bande passante	2-100Mbps	1-3 Mbps	20-250Kbps	1 Mbps
Portée (mètres)	1-100	10-30	1-75 and more	10
Topologie	Arbre	Arbre	Étoile, arbre, arbre de cluster et maillage	Point à point,étoile
Mémoire	100KB	100KB	32-60KB	128 KB

TABLE 1.1 – Comparaison entre WiFi, Ble, Bluetooth et ZigBee [8].

1.14 Les Défis de RCSF

Dans la conception des réseaux de capteurs sans fils on doit respecter un ensemble des contraintes pour prolonger la durée de vie de réseaux :

1. **Consommation d'énergie** : La contrainte la plus souvent associée à la conception du réseau de capteurs est que les nœuds de capteurs fonctionnent avec une réserve d'énergie limitée. Généralement, ils sont alimentés par des piles, qui doivent être remplacées ou rechargées lorsqu'elles sont épuisées. Quelques nœuds sont simplement jetés une fois que leur source d'énergie est épuisée. Pour prolonger la durée de vie opérationnelle d'un réseau de capteurs, l'efficacité énergétique doit être prise en compte dans tous les aspects de la conception du réseau de capteurs, pas seulement matériel et logiciel, mais aussi architectures et protocoles réseau [33].
2. **Contraintes matérielles** : Les capteurs ont des capacités de traitement et de stockage limitées et ne peuvent donc effectuer que des calculs limités. Ces contraintes matérielles présentent de nombreux défis en matière de développement logiciel et de protocole réseau, qui doivent prendre en compte non seulement la contrainte énergétique dans les nœuds, mais également le traitement et les capacités de stockage des capteurs [33].
3. **Environnement** : Un réseau de capteurs fonctionne généralement dans un environnement dynamique. D'une part, la topologie d'un réseau de capteurs peut changer fréquemment en raison de pannes de nœuds, d'ajouts ou d'épuisement d'énergie. D'un autre côté, les nœuds de capteurs sont reliés par un support sans

fil, La connectivité du réseau peut être fréquemment perturbée en raison de l'évanouissement du canal ou de l'atténuation du signal [33].

4. **Agrégation de données** : À l'intérieur d'un réseau de capteurs, les nœuds génèrent une grande quantité de données. Dans la plupart des cas, ces données ne sont pas nécessaires à la station de base, il y a donc un coût élevé, en termes de consommation d'énergie et d'utilisation de bande passante, sur le transport de toutes les données des nœuds à la station de base. Cependant, comme les nœuds sont physiquement proches les uns des autres, les données ont probablement un certain type de redondance. L'agrégation des données est essentielle pour le fonctionnement efficace du réseau de capteurs sans fil. L'agrégation de données a été largement reconnue comme une méthode efficace pour réduire la consommation d'énergie en réduisant le nombre de paquets envoyés [33].

1.15 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les RCSFs et nous avons posé les briques de base sur quelques concepts nécessaires à la compréhension de nos problématiques dans la suite de ce mémoire, Nous avons évoqué les formes de dissipation et les sources de surconsommation d'énergie par un nœud capteur et leurs domaines d'utilisation ont aussi été évoqués au cours de ce chapitre. Nous avons remarqué au travers de nos relevés que la consommation énergétique du nœud capteur est le principal frein à la performance de réseaux de capteurs sans fil. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la technique de regroupement des capteurs pour concevoir un outil de conservation d'énergie.

Clustering dans les réseaux de capteurs sans fil

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu quelques problèmes de l'énergie et de communication des nœuds de capteurs , les chercheurs ont proposé de nouvelles solutions pour développer des techniques d'économie d'énergie pour ces nœuds pour durer le plus longtemps possible, La technique de clustering a été proposée comme l'une des bonnes solutions pour la conservation de l'énergie. Dans ce chapitre, nous allons présente, la technique de clustering dans les RCSFs comme une solution au problème d'énergie. Nous allons présenter aussi les différents approches utilisées pour concevoir une telle configuration.

2.2 Clustering dans les RCSF

Le clustering ou le regroupement des nœuds en groupes (clusters) a été largement adopté par la communauté de recherche pour atteindre l'objectif d'évolutivité et atteindre généralement une efficacité énergétique élevée et prolonger la durée de vie du réseau dans les RCSFs à grande échelle. Les protocoles de routage hiérarchiques regroupement les nœuds de capteurs dans des groupes (clusters). Chaque cluster de la structure hiérarchique du réseau contient un leader, également connu sous le nom de chef de cluster ou cluster head (CH), qui assume habituellement des responsabilités spécifiques (fusion et agrégation), ainsi que de multiples nœuds de capteurs communs en tant que membres [5].

Le processus de création de groupes aboutit finalement à une hiérarchie à deux niveaux, avec des nœuds CH en haut et des nœuds membres de clusters en bas. Les nœuds de capteurs fournissent régulièrement des données aux nœuds CH associés. Les nœuds CH combinent les données et les envoient à la station de base (BS) soit directement, soit via une connexion intermédiaire avec d'autres CH. Les nœuds CH, d'autre part, transmettent toutes les données sur des distances plus longues que les nœuds membres, donc ils dépensent naturellement plus d'énergie.

Une technique populaire pour équilibrer la consommation d'énergie entre tous les nœuds de réseau est de ré-sélectionner de nouveaux CHs dans chaque cluster sur une base régulière (tournant ainsi le rôle de CH parmi tous les nœuds au fil du temps). La figure 2.1 illustre un exemple typique de transfert de données hiérarchiques inféré à l'intérieur d'un réseau groupé [5].

Le BS est le point de traitement des données reçues, ainsi que l'emplacement où les données sont accessibles par l'utilisateur final. Il est souvent considéré comme stationnaire et situé loin des nœuds du capteur. Les nœuds CH servent de point de connexion entre les nœuds du capteur et le BS. Comme indiqué précédemment, l'objectif de chaque CH est d'exécuter des fonctions communes pour tous les nœuds du cluster, comme l'agrégation des données avant de les transmettre au BS. Le CH sert d'évier pour les nœuds membres de groupes, tandis que le BS sert d'évier pour les CH. En outre, la structure construite entre les nœuds de capteurs, l'évier (CH) et la station de base (BS) peut être reproduite autant de fois que nécessaire [5].

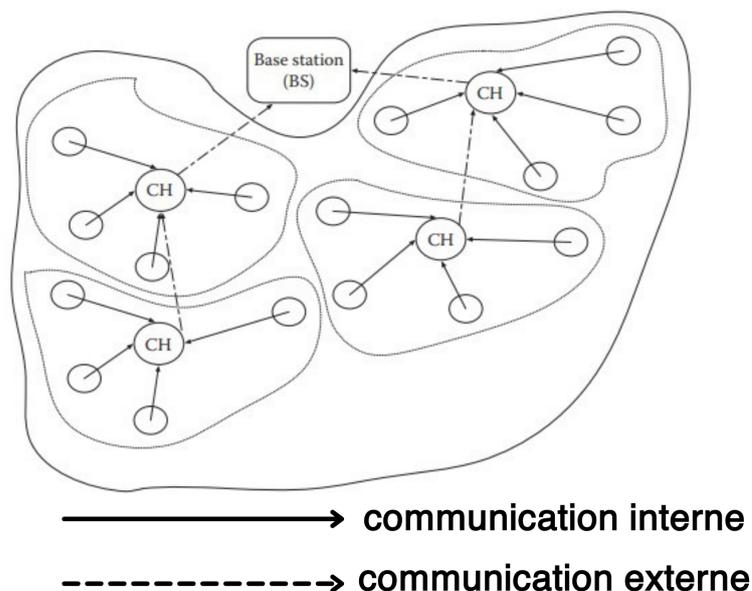


FIGURE 2.1 – Communication de données dans une configuration hiérarchique[5].

2.2.1 Les Objectifs de Clustering dans les RCSFs

Dans les RCSF, le regroupement hiérarchique peut améliorer l'évolutivité, la longévité et l'efficacité énergétique globales du système. Le routage hiérarchique est une approche rentable pour réduire la consommation d'énergie dans un cluster en effectuant l'agrégation et la fusion des données pour réduire la quantité de messages envoyés au BS. Par contre, comme les capteurs ne sont souvent pas capables de transmission à longue distance, l'architecture à palier unique n'est pas évolutive pour un plus grand nombre de capteurs couvrant une région plus vaste. Pour les applications qui nécessitent une évolutivité à des centaines ou des milliers de nœuds, le regroupement hiérarchique est très bénéfique. Dans ce cas, l'évolutivité nécessite un équilibrage de charge et une utilisation optimale des ressources [34].

Clustering offre un certain nombre d'avantages et d'objectifs supplémentaires, en plus d'améliorer l'évolutivité du réseau et de réduire la consommation d'énergie grâce à l'agrégation des données [34]. Il peut localiser la configuration de la route à l'intérieur du cluster, réduisant la taille de la table de routage conservée sur chaque nœud. Il peut également économiser la capacité de communication en limitant les contacts entre les nœuds et en évitant les doubles flux de messages entre les nœuds de capteurs. En outre, la mise en clusters aide à stabiliser la topologie du réseau au niveau des capteurs, ce qui réduit les coûts de maintenance de la topologie. Le CH peut également utiliser des tactiques de

gestion améliorées pour améliorer les performances du réseau et prolonger la durée de vie de la batterie des capteurs ainsi que la durée de vie du réseau. Un CH peut organiser les opérations dans le cluster de sorte que les nœuds peuvent passer en mode de veille pour consommer moins d'énergie. En outre, les capteurs peuvent être engagés dans un ordre de rotation, avec la durée de transmission et de réception spécifiée, en évitant les rétinés des capteurs, en limitant la redondance de la couverture, et les collision seront évitée.

2.2.2 Les défis des algorithmes de clustering dans les RCSFs

Les méthodes de clustering sont cruciales dans un RCSF parce qu'elles peuvent améliorer considérablement les performances du réseau. Les techniques de regroupement doivent tenir compte de nombreuses contraintes fondamentales dans les RCSFs :

- **Stockage d'énergie restreint** : Comme les nœuds de capteurs sans fil sont de minuscules capteurs fonctionnant sur batterie, leur capacité de stockage d'énergie est limitée. Il est parce que impossible de remplacer leurs batteries une fois qu'elles sont épuisées. Comparativement aux méthodes d'acheminement direct, les techniques de regroupement sont plus écoénergétiques. Ceci peut être accompli en optimisant la formation de groupes, en sélectionnent régulièrement les CHs en fonction de leur énergie résiduelle, et en assurant une communication intra-cluster et inter-cluster efficace pour équilibrer la consommation d'énergie dans les nœuds de capteurs.
- **Durée de vie du réseau** : Parce que les nœuds ont une quantité finie d'énergie, leur durée de vie du réseau est limitée. Les stratégies de regroupement réduisent la quantité d'énergie utilisée dans les communications à l'intérieur et à l'extérieur des clusters, ce qui contribue à prolonger la durée de vie du réseau des RCSF.
- **Capacités limitées** : La taille physique minuscule d'un nœud de capteur et son énergie limitée limitent ses capacités en termes de traitement, de mémoire, de stockage et de communication.
- **Communication sécurisée** : Lorsqu'on considère ces réseaux à des fins militaires, la capacité d'un RCSF à fournir une communication sécurisée devient encore plus critique [10]. L'auto-organisation d'un réseau dépend fortement de l'application pour laquelle il est utilisé. Étant donné que ces petits nœuds sont souvent installés sans surveillance, l'établissement d'une communication intra-cluster

et inter-cluster sûre et écoénergétique est l'un des principaux problèmes dans la construction d'algorithmes de groupement.

- **La création de clusters et la sélection de CHs** : sont les fonctionnalités les plus significatives dans les algorithmes de clustering, la perte d'énergie dans les capteurs due à la transmission directe entre les capteurs et un BS peut être évitée. Dans les applications concrètes, le clustering améliore encore l'évolutivité du RCSF. Les principales difficultés à résoudre dans la conception des algorithmes de regroupement sont la détermination de la taille optimale des clusters, l'élection et la réélection des CHs, et la maintenance des clusters. Les critères d'isolement des groupes et de sélection des CH devraient maximiser l'efficacité énergétique [35].
- **Synchronisation** : Lors de choix d'une technique de regroupement, la synchronisation et la planification auront un impact significatif sur les performances totales du réseau. Les systèmes de transmission comme le TDMA, permettent aux nœuds d'organiser les temps de sommeil sur une base régulière pour économiser de l'énergie. Pour établir et maintenir le calendrier de transmission, ces schémas nécessitent des méthodes de synchronisation.

2.2.3 Les approches de base de Clustering

Sont des procédures de clustering créées pour répondre à des critères supplémentaires, car la nécessité d'une utilisation efficace des RCSFs sur de vastes territoires a considérablement augmenté au cours de la décennie précédente (durée de vie accrue du réseau, consommation d'énergie réduite et uniformément répartie, évolutivité, etc.). Le plus important et le plus fréquemment utilisé d'entre eux était centré sur les protocoles LEACH, EEHC et HEED, dans le but principal de réduire la consommation d'énergie et de prolonger la durée de vie du réseau. Certains d'entre eux (comme LEACH, EEHC et leurs extensions) utilisent une approche aléatoire pour l'élection des CHs (les probabilités initialement attribuées sont utilisées comme base pour l'élection des CHs sont aléatoire), tandis que d'autres (comme HEED et autres) utilisent une approche hybride. méthodologie probabiliste (des critères secondaires, tels que l'énergie résiduelle, sont également pris en compte lors de l'élection du CH) [5]. Dans ce qui suit, nous allons concentrer sur le protocole LEACH et ses extensions.

2.3 Protocole de routage LEACH (Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy)

LEACH est une technique d'auto-organisation basée sur le clustering adaptatif qui utilise une rotation aléatoire du chef de cluster pour répartir uniformément la charge énergétique sur l'ensemble des nœuds de capteurs du réseau. Il est considéré comme l'une des premières méthodes de routage hiérarchique basées sur le clustering. LEACH est basé sur deux hypothèses clés : la station de base est stationnaire et située loin des capteurs, et tous les nœuds du réseau sont homogènes et soumis à des contraintes énergétiques. Le concept de LEACH consiste à regrouper les nœuds de capteurs en fonction de la force du signal reçu et à utiliser les chefs de cluster locaux comme routeurs pour envoyer des données à la station de base [36].

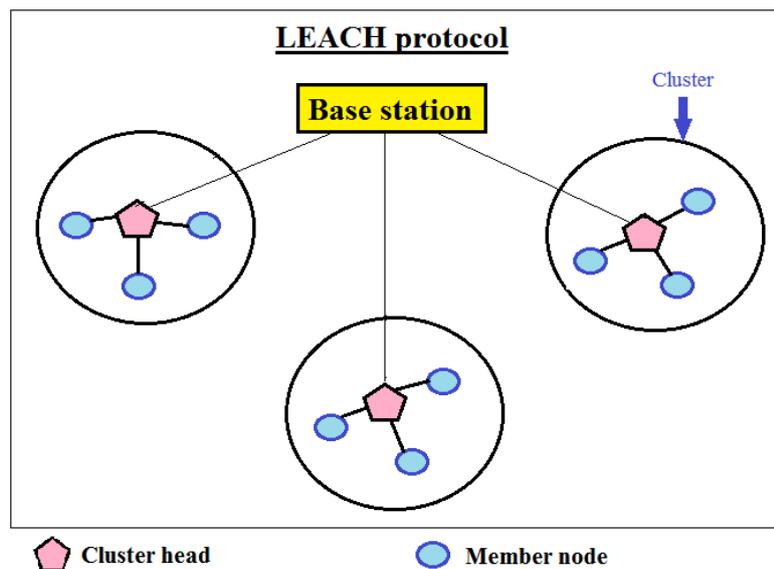


FIGURE 2.2 – Mécanisme de clustering du protocole LEACH [6].

Les dispositifs principaux de LEACH sont :

- Coordination et contrôle localisés entre les nœuds : pour l'initialisation et le traitement de cluster.
- La rotation des clusters qui est randomisée : elle est effectuée par "la station de base" ou "les chefs de clusters".
- Compression locale (agrégation) : Pour limiter la quantité de données qui doivent

être communiquées à la station de base, les nœuds CH compressent les données arrivant des nœuds dans leurs clusters respectifs et envoient un paquet d'agrégation à la station de base.

2.3.1 Fonctionnement du protocole LEACH

Le protocole LEACH comprend deux phases :

Phase de set-up (configuration) :

L'objectif principal de la phase de configuration est de créer des clusters et de choisir le chef de cluster pour chaque cluster en sélectionnant aléatoire [37]. Le processus de configuration se compose de trois étapes de base :

- Advertisement des CHs.
- Configuration des groupes.
- Création de mécanisme de transmission.

Lors de la première étape, chaque nœud génère un nombre aléatoire compris entre 0 et 1, et compare ce nombre à la valeur seuil $T(n)$. Si le nombre est inférieur à $T(n)$, le nœud est sélectionné comme CH, le seuil $T(n)$ est défini comme suit :

$$\begin{aligned} T(n) &= \frac{P}{1 - P * (r \bmod P^{-1})} & \forall n \in G \\ T(n) &= 0 & \forall n \notin G \end{aligned} \quad (2.1)$$

Où

n est un nombre aléatoire compris entre 0 et 1

P est la probabilité du chef de cluster et

G est l'ensemble des nœuds qui n'étaient pas chef de cluster lors des tours précédents

Une fois qu'un nœud est élu en tant que chef de cluster, il ne peut redevenir chef de cluster tant que tous les nœuds du cluster ne sont pas devenus une fois chef de cluster. Ceci est utile pour équilibrer la consommation d'énergie. Dans la deuxième étape, les nœuds non chefs de cluster reçoivent l'annonce du chef de cluster, puis envoient une demande d'adhésion au chef de cluster l'informant qu'ils sont membres du cluster sous ce chef de cluster. Tous les nœuds non chefs de cluster économisent beaucoup d'énergie en éteignant

leur radio tout le temps et ne l'allument que lorsqu'ils ont quelque chose à transmettre au chef de cluster.

Dans la troisième étape, chacun des chefs de cluster choisis crée un programme de transmission pour les nœuds membres de leur cluster. La planification TDMA est créée en fonction du nombre de nœuds dans le cluster. Chaque nœud transmet ensuite ses données dans la période alloué [37].

Phase stationnaire :

En phase stable, les nœuds du cluster envoient leurs données au cluster head. Les capteurs membres de chaque cluster ne peuvent communiquer qu'avec le chef de cluster via une transmission à un seul saut. Le chef de cluster agrège toutes les données collectées et transmet les données à la station de base soit directement, soit via un autre chef de cluster avec la route statique définie dans le code source. Après un temps prédéfini, le réseau repasse en phase de set-up [38].

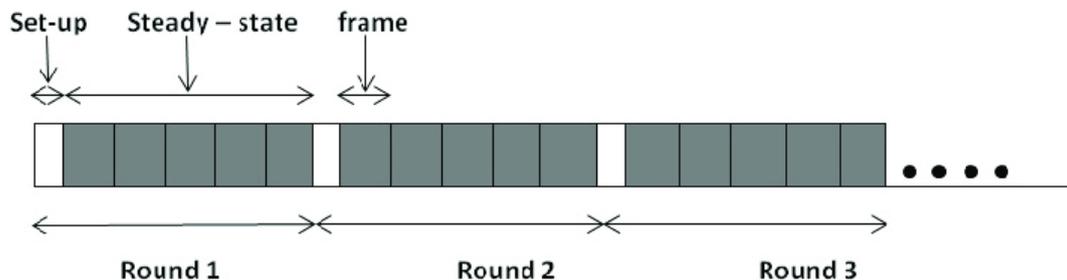


FIGURE 2.3 – Chronologie de fonctionnement de LEACH [7].

2.3.2 Les avantages et les inconvénients de LEACH

Le protocole LEACH offre un certain nombre d'avantages, y compris une gestion efficace des ressources du réseau tout en respectant un certain nombre de limites, telles que la consommation d'énergie. Bien que LEACH réduise la consommation d'énergie par rapport à la transmission directe, grâce à l'agrégation des données et à la réutilisation de la bande passante, un certain nombre d'inconvénients restent plus ou moins apparents [39]. Les avantages et les inconvénients du protocole LEACH sont présentes comme suit :

Les avantages de LEACH :

- **Protocole d'auto-organisation :** LEACH est totalement distribué, ce qui signifie que les nœuds prennent leurs propres décisions et agissent localement, sans avoir besoin d'informations globales ou d'un mécanisme de suivi. De plus, les données sont recueillies régulièrement (l'utilisateur n'a pas besoin de toutes les données immédiatement). Pour utiliser cette fonctionnalité, ce protocole utilise le regroupement adaptatif, qui réorganise les groupes après un intervalle de temps aléatoire, en utilisant des contraintes énergétiques afin d'avoir une dissipation d'énergie uniforme à travers tout le réseau [40].
- **Faible énergie pour l'accès au média :** Le mécanisme de groupe permet aux nœuds d'interagir avec leurs CH sur de courtes distances afin d'optimiser l'utilisation du canal de communication en permettant qu'il soit traité localement par un CH pour éviter les interférences et les collisions.
- **Compression locale (agrégation) :** Pour limiter la quantité de données qui doit être communiquée au nœud de puits, les CHs compressent les données entrantes de leurs membres et lui envoient un paquet agrégé. Cela simplifie l'administration du réseau, réduit la consommation d'énergie et rend le réseau plus évolutif en réduisant la complexité des algorithmes de routage.

Les inconvénients de LEACH :

- Si les nombres aléatoires générés par tous les nœuds du réseau sont supérieurs à la probabilité P_i , il se peut qu'aucun CH est élu tout au long d'une round (t).
- En comparaison avec les nœuds les plus proches de la CH, les nœuds distants périssent rapidement.
- Le protocole LEACH ne convient pas aux applications en temps réel en raison de sa latence élevée (utilise TDMA).
- Il n'est pas clair si les CH sont répartis uniformément. Par conséquent, les CH peuvent être concentrés dans une certaine zone du réseau. En conséquence, certains nœuds seront sans CH dans leur voisinage immédiat.
- Le protocole LEACH n'est pas sécurisé ne comporte aucun dispositif de sécurité intégré. Par conséquent, il est très vulnérable même aux simples attaques, En conséquence, un attaquant peut rapidement dominer le réseau.

2.4 Les algorithmes de clustering

Dans cette section, nous présentons quelques algorithmes qui sont les plus efficaces pour le clustering.

2.4.1 L'algo de K-Means

L'algorithme de clustering K-Means est proposé par Mac Queen en 1967, K-Means est une méthode basée sur la division typique. C'est une méthode pour classer ou grouper les nœuds en K clusters basés sur des attributs/fonctionnalités. Le nombre K est un entier positif. La somme des carrés de distances entre les données et le point de centre correspondant est minimisée pour le clustering. Le but du regroupement des moyennes K est de catégoriser les données . Il est largement utilisé dans l'analyse de clusters car l'algorithme K-means a une efficacité et une évolutivité plus élevées et converge rapidement lorsqu'il s'agit de grands ensembles de données [41].

Les avantages de K-Means :

- Algorithme basé sur le meilleur point de center.
- Très lucide et peut évoluer pour une grande quantité d'ensembles de données.
- Réduit la mesure de la variance intra-cluster.

L'inconvénient de K-Means :

- Le nombre de clusters k doit être défini à l'avance.

2.4.2 L'algo de gaussian mixture model (GMM)

Un modèle de mélange gaussien : est un modèle probabiliste basé sur la distance qui suppose que tous les points de données sont créés par une combinaison linéaire de distributions gaussiennes multivariées avec des paramètres inconnus. Comme K-means, il prend en compte les centres des distributions gaussiennes latentes mais contrairement à K-means, la structure de covariance des distributions est également prise en compte. Pour identifier à plusieurs reprises les paramètres de distribution qui maximisent une métrique de qualité de modèle appelée log de vraisemblance, la technique utilise l'algorithme de maximisation des attentes [42]. Voici les principales étapes de ce modèle :

- Création d'un ensemble de k distributions gaussiennes.
- Détermination de la probabilité que chaque point soit associé à chacune des distributions.
- Recalculez les paramètres de distribution à l'aide des probabilités associées à chaque point des distributions.
- Continuer jusqu'à ce que la log-vraisemblance soit maximisée.

Dans GMM, il existe quatre façons de calculer les covariances :

1. **Complète** : chaque distribution a sa propre matrice de covariance générale.
2. **Égalité** : la matrice de covariance universelle est partagée par toutes les distributions.
3. **Diag** : il existe une matrice de covariance diagonale pour chaque distribution.
4. **Sphérique** : chaque distribution a sa propre variance distincte.

Les avantages de GMM :

- Robuste aux valeurs aberrantes.
- Converge rapidement avec une bonne initialisation.

L'inconvénient de GMM :

- L'algorithme est très complexe et peut être lent.

2.4.3 L'algo de Agglomerative Hierarchy clustering

C'est une approche de clustering ascendante dans laquelle les clusters sont divisés en sous-clusters, eux-mêmes divisés en sous-clusters, etc. Cette qualité hiérarchique peut être observée dans les données d'expression génique. Chaque élément (gène ou échantillon) est placé dans un cluster unique dans un clustering hiérarchique agglomératif. Ensuite, il agglomère (fusionne) la paire de clusters la plus proche à chaque itération en remplissant certains critères de similarité, jusqu'à ce que toutes les données soient dans un seul cluster [43]. Il existe plusieurs options pour connecter des éléments de données dans un ordre séquentiel :

- **Liaison unique** : elle minimise la distance entre les observations les plus proches des paires de clusters.

- **Liaison complète ou maximale** : essaie de minimiser la distance maximale entre les observations de paires de clusters.
- **Liaison moyenne** : elle minimise la moyenne des distances entre toutes les observations de paires de clusters.
- **Ward** : Semblable au k-means car il minimise la somme des différences au carré dans tous les clusters mais avec une approche hiérarchique.

Les avantages de Agglomerative Hierarchy clustering :

il peut produire un ordre des objets, qui peut être informatif pour l'affichage des données. Des clusters plus petits sont générés, ce qui peut être utile pour la découverte. Ainsi, cette technique permet de déterminer la similitude entre les prototypes et les points de données.

Les inconvénients de Agglomerative Hierarchy clustering :

- Coûteux en calcul.
- Ne peut pas gérer les valeurs aberrantes.
- Génère des clusters de même taille.

2.4.4 L'algo de k-nearest neighbors (KNN)

C'est un algorithme de classification supervisée. Il prend un ensemble de points étiquetés et les utilise pour apprendre à étiqueter davantage. Pour nommer un nouveau point, il regarde les points étiquetés les plus proches de lui, qui sont ses voisins les plus proches et leur demande de voter. Ainsi, quelle que soit l'étiquette que la majorité des voisins ont, c'est l'étiquette du nouveau point. Le nombre de voisins qu'il vérifie est indiqué par la lettre "k" dans K-Voisins les plus proches. Il est supervisé, car elle est essayée de classer un point en fonction de la classification connue d'autres points [44].

Fonctionnement de KNN :

1. Détermination de la valeur de K.
2. Calcul des distances entre la nouvelle entrée (données d'essai) et toutes les données de formation.

3. Triez la distance et déterminez K voisins les plus proches en fonction des valeurs de distance minimum.
4. Analysez la catégorie de ces voisins et attribuez la catégorie pour les données de test en fonction du vote majoritaire.
5. Renvoie la classe prédite.

Les avantages de KNN :

- Assez intuitif et simple.
- Aucune étape de formation.

Les inconvénients de KNN :

- Algorithme lent, fonctionne mal avec un grand nombre de variables d'entrée.
- Ne fonctionne pas bien sur des données déséquilibrées.

2.4.5 Algorithme de DBSCAN

DBSCAN (Density based spatial clustering of applications with noise), c'est une technique de clustering basée sur la densité qui peuvent découvrir des clusters de forme arbitraire et également gérer efficacement le bruit ou les valeurs aberrantes [45]. L'algorithme DBSCAN a une complexité temporelle quadratique avec la taille du jeu de données. L'algorithme peut être étendu à de grands ensembles de données en réduisant sa complexité temporelle en utilisant des structures d'index spatiales comme les R-trees [46] pour trouver les voisins d'un motif. Mais, ils ne peuvent pas être appliqués pour des ensembles de données de grande dimension.

Les avantages de DBSCAN :

- Peut gérer des clusters de différentes formes et tailles.
- Il n'est pas nécessaire de spécifier le nombre de clusters.

Les inconvénients de DBSCAN :

- Très sensible aux deux paramètres points eps et min.

- DBSCAN ne peut pas bien regrouper les ensembles de données avec une grande variance de densités.

2.4.6 Comparaison de certains algorithmes de clustering

Le tableau 2.1 compare KMeans , GMM, kNN , DBSCAN et Agglomerative Hierarchical clustering.

Algorithmes	Complexité	Taille de données	Nombre de clusters	Types de clustering	Évolutivité	Centralisé sur RCSFs
K-means [47]	$O(n)$	Énormes et petites données	Grand et petit	Non supervisé	Oui	Oui
Agglomerative Hierarchy clustering [48]	$O(n^3)$	petites et moyennes données	Moyen et petit	Non supervisé	Oui	Oui
DBSCAN [47]	$(n \log n)$	petites et moyennes données	Moyen et petit	Non supervisé	Oui	Oui
GMM [49]	$O(NkD^3)$	Énormes et petites données	Grand et petit	Non supervisé	Non	Oui
KNN [50]	$O(n)$	petites et moyennes données	Moyen et petit	supervisé	Oui	Oui

TABLE 2.1 – Comparaison de certains algorithmes de clustering.

Nous avons conclu de cette comparaison que le clustering K-means est l'un des algorithmes d'apprentissage automatique non supervisé les plus simples et les plus populaires et qu'il est plus efficace pour traiter les grandes bases de données que les autres algorithmes de clustering.

2.5 L'algorithme de K-means pour les RCSFs

L'algorithme de k-means, il est sans aucun doute la méthode de partitionnement la plus connue et la plus utilisée dans divers domaines d'application scientifique et industrielles. Ce succès est dû au fait que cet algorithme présente un rapport coût/efficacité avantageux. Dans sa version classique, l'algorithme consiste à sélectionner aléatoirement k objets qui représentent les centroïdes initiaux. Un objet est assigné au cluster pour lequel la distance entre l'objet et le centroïde est minimale. Les centroïdes sont alors recalculés et l'on passe

à l'itération suivante [51]. la fonction objective traditionnellement utilisé est la suivante :

$$F = \sum_r^k \sum_{x_i \in C_r} (x_i - g_r)^2 \quad (2.2)$$

Où :

- C_r est le cluster numéro r.
- x_i est un objet dans un cluster C_r .
- g_r est le centre du cluster C_r .

La méthode des k-means se déroule comme suit :

1. On tire au hasard k centroïdes (nombre de clusters).
2. On associe chaque noeud au centroïde le plus proche.
3. Après avoir affectés chaque nœud du réseau à l'un des clusters k, le regroupement se fait en calculant le centroïde de chaque cluster.
4. Puis on recommence les étapes 2 et 3 jusqu'à ce que les noeuds affectés à un centre ne changent plus

2.5.1 Choix du nombre des clusters

Les performances de l'algorithme de clustering K-means dépendent des clusters hautement efficaces qu'il forme. Mais choisir le nombre optimal de clusters est une tâche importante. Il existe différentes manières de trouver le nombre optimal de clusters comme :

- **Valeurs de K spécifiées dans une plage ou un ensemble :** La valeur de K utilisée dans une méthode de clustering peut avoir un impact sur ses performances. En conséquence, plutôt que d'utiliser un seul K prédéterminé, une variété de valeurs pourrait être utilisée. Il est essentiel que le nombre de valeurs considérées sont suffisamment grandes et reflètent les propriétés uniques des ensembles de données. En même temps, les valeurs choisies doivent être beaucoup moins nombreuses que le nombre d'éléments dans les ensembles de données, ce qui est la principale justification du clustering de données [52].

- **Valeurs de K spécifiées par l'utilisateur :** L'implémentation de l'algorithme K-means dans de nombreux progiciels d'exploration ou d'analyse de données [19–22] nécessite que le nombre de clusters soit spécifié par l'utilisateur. Pour trouver un résultat de clustering satisfaisant, habituellement, un certain nombre d'itérations sont nécessaires où l'utilisateur exécute l'algorithme avec différentes valeurs de K. La validité du résultat de clustering est simplement évaluée visuellement, sans mesures de performance formelles appliquées. Les utilisateurs trouveront difficile d'évaluer le résultat du clustering d'ensembles de données multidimensionnels à l'aide de cette méthode [52].
- **Valeurs de K déterminée dans une étape de traitement ultérieure :** Lorsque le clustering K-means est utilisé comme outil de prétraitement, le nombre de clusters est déterminé par les exigences spécifiques de l'algorithme de traitement principal. Aucune attention n'est accordée à l'effet des résultats de clustering sur la performance de cet algorithme. Dans de telles applications, l'algorithme K-means est employé juste sans validation du résultat de clustering [52].

2.5.2 Utilisation de K-means pour RCSFs

L'algorithme proposé dans [53] utilise l'algorithme K-means, qui divise les nœuds en clusters en fonction de leurs distances euclidiennes. Le processus de sélection CH suggéré est divisé en trois étapes.

- **Étape 1 :** L'algorithme K-means de clustering initial est exécuté pour la formation de clusters dans RCSF. Supposons que le RCSF de n nœuds est divisé en k clusters. Premièrement, k nœuds sur n sont choisis au hasard pour être les CH. Selon la distance euclidienne, chacun des nœuds restants choisit le CH qui lui est le plus proche.
- **Étape 2 :** regroupement Après que chacun des nœuds du réseau a été affecté à l'un des k clusters, le centroïde de chaque cluster est calculé. En supposant un espace bidimensionnel, le centroïde d'un cluster de s nœuds est calculé comme suit :

$$Centroid(X, Y) = \left(\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s x_i, \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s y_i \right) \quad (2.3)$$

Ou :

— S est le nombre de membres du cluster.

- **Étape 3 :** (Sélection du CH), une fois les clusters construits, chaque nœud du cluster reçoit un numéro d'identification basé sur sa distance par rapport au centroïde, le nœud le plus proche recevant un numéro inférieur. Par conséquent, le numéro d'identification joue un rôle important dans la sélection d'un nœud CH.

À chaque étape, l'énergie restante du CH est vérifiée pour s'assurer que le réseau reste connecté. Si l'énergie du CH est inférieure au seuil. Le CH nouvellement élu informe les autres nœuds que le CH a changé.

2.6 Conclusion

Nous avons présente, dans ce chapitre le concept de clustering dans les RCSFs et leurs principales caractéristiques , c'est considéré l'approche la plus efficace pour améliorer le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons présenter les approches de base de clustering, le protocole de routage LEACH et comment ça fonctionne et nous avons fait une comparaison entre les algorithmes de clustering, enfin, nous avons discuté la technique de clustering k-means comme l'une des meilleures techniques de clustering actuellement utilisées. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter notre approche de clustering qui est : clustering avec double chefs de cluster.

Clustering avec double chefs de groupe à l'aide de K-means pour les RCSFs

3.1 Introduction

Notre objectif est de proposer un protocole de routage à double chef de cluster (DCHRP) ayant deux chefs pour chaque cluster pour améliorer la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil et réduire la consommation d'énergie. Nous proposerons un algorithme qui s'appuie l'apprentissage automatique. Dans cette approche, nous avons deux chefs appelés le cluster-head et le cluster-head-vice , où ils répartissent les tâches qui étaient effectuées par le cluster-head seule metr dans le protocole LEACH , ce qui nous attendant une réduction de la consommation d'énergie et à maintenir une prolongation de la durée de vie du réseau le plus longtemps possible. En bref, la communication intracluster est géré par le cluster-head-vice(CHV) et la communication avec inter-cluster par le cluster-head (CH).

3.1.1 Scenario de la solution

Nous utiliserons l'algorithme de K-means pour regrouper les nœuds. L'algorithme de K-means dans l'exploration de données commence par un premier groupe de centroïdes sélectionnés au hasard, qui sont utilisés comme points de départ pour chaque cluster, puis effectue des calculs itératifs (répétitifs) pour optimiser les positions des centroïdes. Les centroïdes initiaux dans les clusters sont appelés chefs de cluster, le nœud avec la plus grande d'énergie restante et le plus proche au milieu du cluster sont choisis comme CH,

le nœud le plus proche du CH du cluster et avec l'énergie la plus élevée du cluster sont choisis comme CHV. La tête supplémentaire est appelée tête de sous-groupe ou vice-groupe. Le CHV est un nœud unique qui se connecte au nœud CH et gère la collecte, la compression et l'agrégation d'informations. Cela réduira considérablement le fardeau de CH. Tous les membres du cluster communique avec le CHV, qui supervisera les opérations du cluster et regroupera les données totales. Il supervisera l'intégrité des messages, de la segmentation et du contrôle séquentiel. Le CHV ne transmettra les données qu'à tous le CH et le CH s'occupera de toutes les communications avec le système externe. Les données seront envoyées à la station de base via le CH avec une communication multi-saut. Par conséquent, pour la grande majorité du temps, les nœuds CHs auront une communication dynamique. Par conséquent, les têtes perdront de l'énergie plus rapidement que les nœuds normaux. La réconfiguration du réseaux d'une façon periodique, va permettre d'équilibre la consommation d'énergie sur la totalité des neouds.

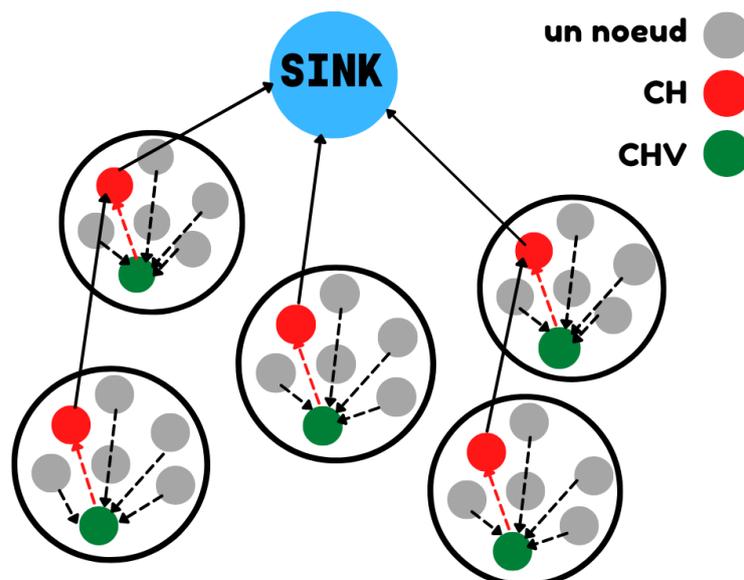


FIGURE 3.1 – Architecture de l'approche proposée

3.1.2 Motivations

Les principaux défis des réseaux de capteurs sans fil sont :

- Le principal problème est le défi énergétique des RCSFs, c'est pourquoi il faut que la consommation d'énergie lors de la transmission soit au minimum.
- La méthode courante appelée protocole LEACH amélioré [54], est la méthode

conventionnelle qui résout le problème associé à l'énergie seule et la distance minimale et les autres paramètres de La qualité de service ne sont pas pris en compte.

Ces défis ont été considérés comme la motivation pour développer l'algorithme proposé. L'algorithme proposé tente de proposer une solution à certains problèmes des réseaux de capteurs sans fil et de réduire la consommation d'énergie des nœuds de capteurs en ajoutant un vice-chef de cluster. Afin de réduire la charge sur le CH. Les cluster heads sont utilisées pour répartir la consommation d'énergie entre le CH et le CHV. Cet algorithme réduisant l'énergie du CH dépensée pour récolter les informations des nœuds membres.

3.2 Travaux connexes

Dans [55], les auteurs ont proposé une adaptation de protocole LEACH avec une amélioration de la procédure de clustering. L'algorithme de clustering K-Means et LEACH ont été liés pour améliorer l'affectation de clustering afin d'améliorer la particularité du cluster et pour rendre le processus efficace en terme d'énergie pour augmenter la durée de vie du RCSF. Les résultats de la simulation ont confirmé que le système fonctionnait mieux que le protocole LEACH et la vie du réseau s'est améliorée.

Dans [56], les auteurs ont proposé un algorithme « fuzzy logic approach to cluster-head election », l'approche proposé prend en compte trois descripteurs - l'énergie, la concentration et la centralité. La simulation montre qu'en fonction de la configuration du réseau, une augmentation substantielle de la durée de vie du réseau peut être obtenue par rapport à la sélection probabiliste des nœuds en tant que cluster heads en utilisant uniquement des informations locales.

Les systèmes probabilistes d'élection de chef de cluster, tels que ceux présentés dans [57] [58], garantissent que le rôle de chef de cluster est réparti équitablement entre les nœuds du réseau, prolongeant la durée de vie des nœuds capteurs grâce à une consommation d'énergie équilibrée.

Dans [59], les auteurs ont trouvé les paramètres de clustering optimaux tels que la probabilité de devenir un chef de cluster et le rayon du cluster pour un réseau organisé en clusters à un et plusieurs niveaux en minimisant le coût de communication du réseau. Pour la sélection du chef de cluster, l'algorithme de clustering HEED [60] utilise un critère hybride qui prend en compte l'énergie résiduelle du nœud ainsi qu'un paramètre secondaire,

comme la proximité du nœud avec ses voisins ou le degré de voisinage du nœud. Dans les configurations de réseau avec des nœuds de capteurs uniformément répartis, HEED prolonge la durée de vie du réseau en assurant une dissipation d'énergie équilibrée et une dispersion uniforme des nœuds de cluster head. Tous ces travaux visent à prolonger la durée de vie d'un réseau en équilibrant la dissipation d'énergie entre les nœuds.

Les auteurs introduisent le protocole de routage GAF dans [61], qui gère l'architecture du réseau et utilise la densité de nœuds pour prolonger la durée de vie du réseau. GAF crée une grille virtuelle sur tout le réseau à l'aide d'informations géographiques et un seul nœud de capteur est actif dans chaque cellule. La technique de clustering CEC [62], améliore GAF en évitant l'utilisation d'informations de localisation et en diminuant davantage les nœuds redondants en les combinant en clusters, avec des nœuds principaux de cluster choisis parmi les nœuds avec le plus d'énergie restante. Ni GAF ni CEC ne peuvent garantir que le réseau couvrira toute la zone.

Dans [63], les auteurs ont introduit un « Double Cluster Head Heterogeneous Clustering for Optimization in Hybrid Wireless Sensor Network » L'algorithme MDCH-PSO proposé se compose de quatre phases. Ils sont la planification des clusters, l'élection CH, la prédiction de la mobilité et le transfert. Dans la phase de planification du cluster, les nœuds membres associés à un nœud de capteur hétérogène appelé « nœud femelle » sur la base de l'indication de l'intensité du signal reçu. Le «nœud masculin» est élu en fonction de la valeur de fitness calculée à l'aide de l'algorithme PSO. Une valeur de puissance est calculée sur la base de l'énergie résiduelle, de la densité de nœuds, de la distance au nœud femelle et de la vitesse mobile de chaque nœud par le nœud femelle. La latence due à la prédiction de la mobilité et au transfert.

Un algorithme basé sur la chaîne "Power-Eficient Gathering in Sensor Information Systems with Double Cluster Head (PDCH)" est proposé dans [64], où les cluster heads sont classés en MCH et CH secondaire. Les paramètres tels que l'énergie et la distance au CH ont été utilisés pour la sélection du CH. Une valeur d'étiquette est calculée à l'aide des paramètres et du nombre de voisins. Un nœud avec une valeur d'étiquette plus élevée et avec plus de deux voisins a été élu comme MCH et l'un de ses voisins au niveau suivant est élu comme CH secondaire.

Dans [65], les auteurs ont introduit un « Double Cluster-Head topology Control Algorithm » (DCCCA) pour un réseau hétérogène. La valeur de pondération décide du CH

principal, le CH principal (MCH) collecte les données et les transfère par un CH adjoint (ACH) au CH suivant. L'énergie résiduelle du nœud MCH est estimée par la station de base après chaque cycle de transmission de données et un seuil d'énergie est défini pour le cycle suivant. La réélection a lieu lorsque l'énergie résiduelle du MCH est inférieure à la valeur d'un seuil prédéfinie.

Les auteurs de [66] ont proposé une technique de "Double Head Static Cluster" (DHSC) pour surmonter les problèmes de distribution inégale des nœuds. MCH est utilisé dans les zones épaisses et ACH dans les zones minces pour réduire la consommation d'énergie d'un seul chef de cluster. MCH est le nœud avec l'énergie de communication la plus faible et l'indicateur de force du signal reçu (RSSI) le plus élevé dans une région épaisse.

dans [67], les auteurs ont introduit un «Multiple Cluster-heads Routing Protocol» (MCHRP). Pour le choix de CH, l'algorithme MCHRP utilise une stratégie max-min. L'élection du Vice CH (VCH) est basée sur l'énergie résiduelle, la distance entre le nœud et le CH, la distance entre le nœud et la station de base et la fréquence de devenir CH.

La méthode «Virtual Area Partition-Double Cluster Head» (VAP-DCH) introduite dans [68] adopte une approche probabiliste de la sélection CH. Toute la zone de couverture est séparée en partitions virtuelles et les facteurs de choix sont l'énergie, la couverture et la distance des nœuds. Le nœud avec la plus grande probabilité est choisi comme MCH, tandis que le nœud avec la deuxième probabilité la plus élevée est choisi comme VCH.

Les algorithmes «Double Cluster Head Model» (DCHM) et «Double Cluster Head» (DCH) ont été proposés dans [69] [70]. Pour réduire la charge du réseau, ils calculent le MCH et les chefs de sous-groupe en utilisant l'énergie résiduelle et la distance des membres. Cela implique moins de messages de contrôle car l'élection CH est réduite. Pour augmenter la transmission à longue distance, la méthode «Double LayerLow Energy Adaptive Clustering Hierarchy» (DL-LEACH) dans [71] contient deux cluster heads, à savoir des clusters de premier niveau et de second niveau dépendant de la distance. Les membres du cluster soumettent des données au deuxième chef de cluster, qui les transmet ensuite à la BS via le premier chef de cluster. Cela permet d'économiser de l'énergie lors de la diffusion sur de longues distances.

La méthode évolutionnaire est utilisée dans la sélection MCH et VCH dans les algorithmes proposés, tels que «Particle Swarm Optimization-Master, Vice» (PSOMV) dans

[72] et «Particle Swarm Optimization-Double Head» (PSO-DH) dans [73]. Pour la sélection du CH, les deux méthodes tiennent compte des critères d'énergie, de distance et de coût. MCH est choisi en fonction de la capacité optimale actuellement disponible dans l'itération maximale, tandis que VCH est choisi en fonction de la valeur de capacité la plus élevée suivante. Dans la communication intra-cluster, MCH est utilisé, tandis que dans la communication inter-cluster, VCH est utilisé.

La technique « Double Layer-Cloud Particle Swarm Optimization » (DL-CPSO) dans [74] contient deux cluster heads, les clusters de premier niveau et de deuxième niveau, qui augmentent la transmission à longue distance en raccourcissant la distance. Les membres du cluster soumettent des données au deuxième chef de cluster, qui les transmet ensuite à la BS via le premier chef de cluster. Cela permet d'économiser de l'énergie en réduisant le temps nécessaire pour envoyer des données sur de grandes distances.

Dans [75], les auteurs ont introduit « Bio-inspired dual cluster heads optimized routing algorithm for wireless sensor networks » en utilisant la technique des cluster heads double basée sur l'algorithme de routage d'optimisation du troupeau de krill (DC-KHO). L'algorithme choisit un chemin optimisé en calculant sa valeur de confiance de chemin à l'aide de l'algorithme de maximisation du troupeau de krill conçu. Dans la méthodologie proposée, le nombre de nœuds dans le réseau X est initialement regroupé à l'aide de l'algorithme K-means. L'algorithme K-means a été très puissant pour positionner les centroïdes initiaux. Il garantit que le placement des centroïdes sous-jacents sont aussi éloignés que possible les uns des autres. Les centroïdes initiaux dans les clusters sont appelés chefs de cluster primaires. Ils sont utilisés pour l'agrégation des données au sein du cluster. Le nœud qui a la plus grande énergie résiduelle dans le cluster sera élu comme cluster secondaire. Le chef de cluster secondaire servira de colonne vertébrale virtuelle pour optimiser le routage.

Dans [73], les auteurs ont introduit « a double cluster-heads clustering algorithm using particle swarm optimization (PSO-DH) » un algorithme génère deux chefs de cluster. L'élection du chef de cluster maître et du vice-chef de cluster doit tenir compte des informations d'état, y compris l'emplacement et l'énergie réservée sur les nœuds et leurs voisins. Le Master Cluster Head (MCH) reçoit et agrège les données de ses nœuds membres. Les données d'agrégation sont envoyées à VCH. Le Vice Cluster Head (VCH) transmet directement les données d'agrégation au station de base. Cet algorithme peut équilibrer la consommation d'énergie, de sorte qu'il peut prolonger efficacement la durée

de vie du réseau.

3.3 Présentation de l'approche proposé (DCHRP)

Le schéma de protocole de routage à double cluster head hiérarchique proposé se déroule en rounds et dans chaque round (période), il y a deux phases : une Phase de set-up (configuration) et une Phase stationnaire.

Phase de set-up :

La première étape vise à organiser le réseau en groupes et à sélectionner les CHs et CHVs. Nous utilisons l'algorithme K-means qui choisit initialement le nombre de clusters en précisant le nombre k qui est le nombre de chefs de groupes primaires à partir du nombre de nœuds vivants, dans notre algorithme proposé nous sélectionnons k par apport du nombre de nœuds vivants. Le clustering avec l'algorithme K-means consiste à prendre chaque nœud du réseau et à l'associer au CH le plus proche, puis à recalculer les nouveaux centroïdes des clusters résultant de l'étape précédente, puis à sélectionner les deux nœuds les plus proches du milieu du cluster et ayant l'énergie la plus élevée du cluster comme CHs et CHVs. Nous remarquons que les CHs et les CHVs changent de position étape par étape dans chaque nouvelle itération de l'algorithme K-means jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de changements ou en d'autres termes, les CH et les CHV ne bougent plus. Cette phase est répétée à chaque nouveau round.

Fonction fitness pour choisir CH

$$E = \text{Energy}_{(\text{noeud } i)} \quad , \quad i \in [1, N] \quad (3.1)$$

$$D = \text{Distance}_{(\text{noeud } i, \text{center})} \quad , \quad i \in [1, N] \quad (3.2)$$

$$\text{MIN } F = \frac{\beta \times D}{\alpha \times E}_{(\text{noeud } i)} \quad , \quad i \in [1, N] \quad (3.3)$$

Fonction fitness pour choisir CHV

$$E = \text{Energy}_{(\text{noeud } i)} \quad , \quad i \in [1, N] \quad \text{et } i \neq CH \quad (3.4)$$

$$D = \text{Distance}_{(\text{noeud } i, \text{center})}, \quad i \in [1, N] \text{ et } i \neq CH \quad (3.5)$$

$$C = \text{Distance}_{(\text{noeud } i, CH)}, \quad i \in [1, N] \text{ et } i \neq CH \quad (3.6)$$

$$MIN \ F = \frac{\beta \times (D + C)}{\alpha \times E}_{(\text{noeud } i)}, \quad i \in [1, N] \text{ et } i \neq CH \quad (3.7)$$

Ou :

- E fonction de calcul d'énergie, E_i est l'énergie du noeud i .
- C fonction de calcul de la distance entre un noeud et le CH.
- D fonction de calcul de la distance. $(D_i, Center)$, la distance entre le noeud et le centre du cluster.
- N Le nombre de noeuds.
- $(\alpha=1, \beta=2)$ La valeur des deux constantes a été suffisamment spécifiée pour nous donner les meilleures mesures d'évaluation des performances pour chaque noeud.

Dans les figures 3.2, 3.3 et 3.4 nous vous expliquons comment se déroule cette phase.

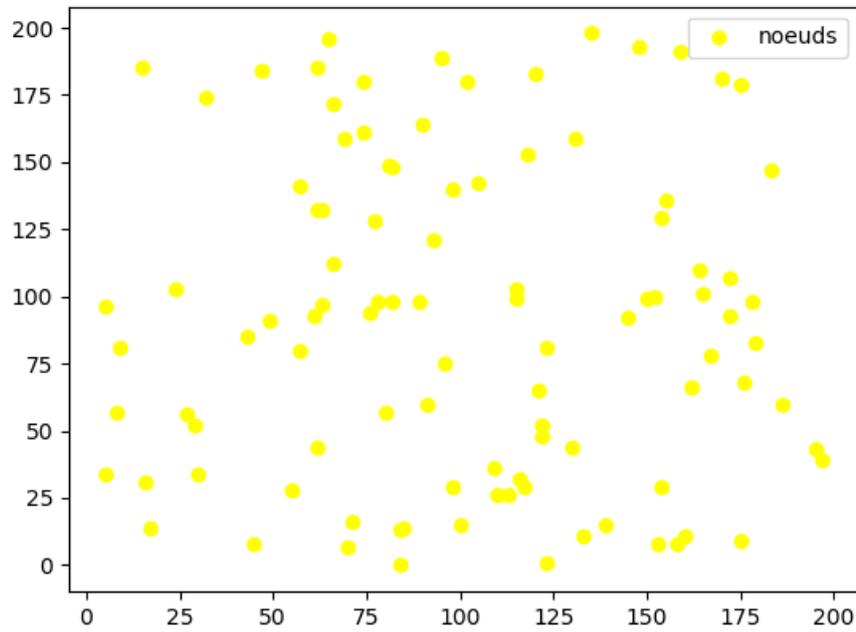


FIGURE 3.2 – Déploiement des noeuds dans une zone 200m x 200m.

L'algorithme de K-means initialise le réseaux par un ensemble de k CH.

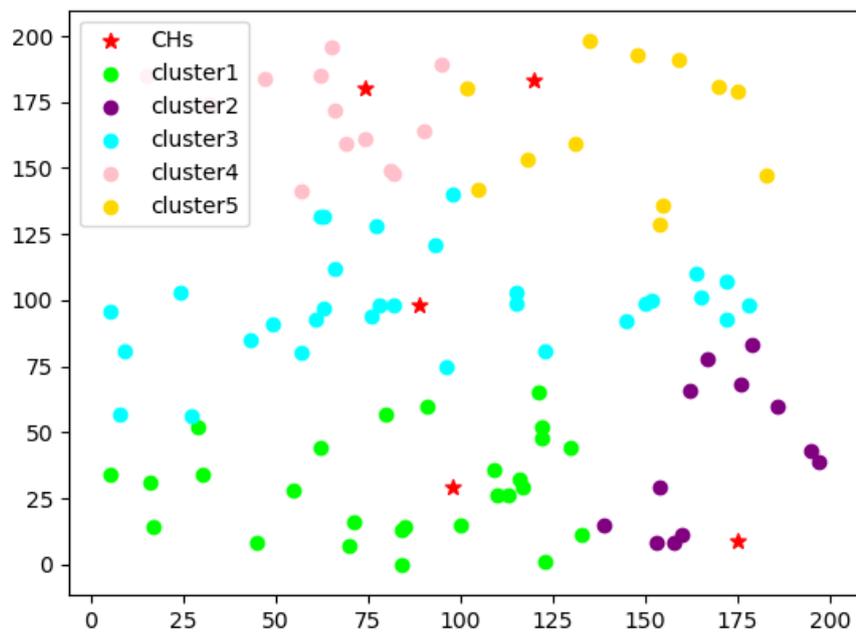


FIGURE 3.3 – Désignation des CHs primaires.

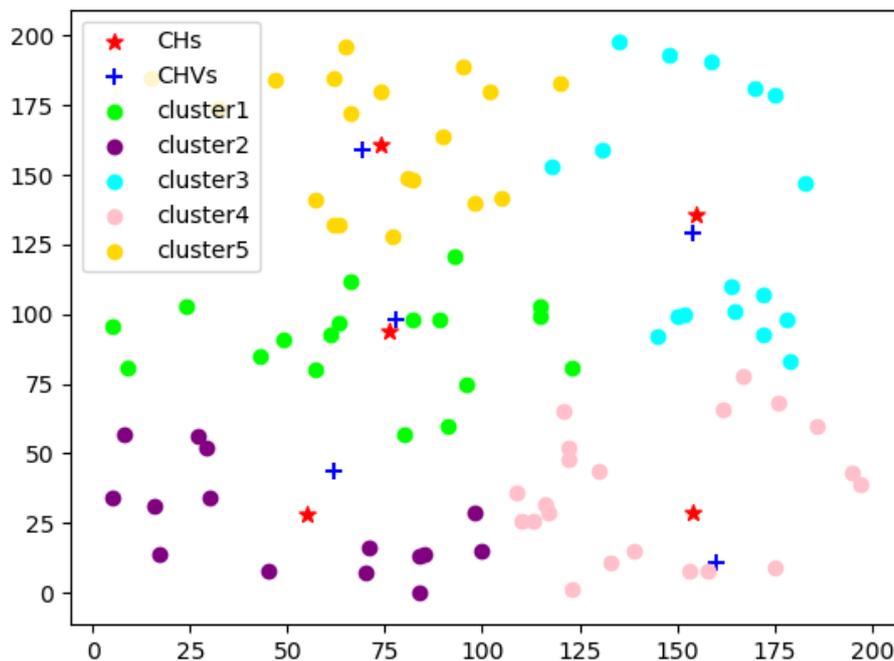


FIGURE 3.4 – Choix des CHs et CHVs après l'itération finale.

Phase stationnaire :

Dans cette phase, les nœuds envoient leurs données au CHV. Les nœuds de chaque cluster ne peuvent communiquer qu'avec le CHV via une transmission à un seul saut. Le CHV agrège toutes les données collectées et transmet les données au CH, après ça le CH transmet les données à la station de base soit directement, soit via un autre chef de cluster (multi saut). Après un temps prédéfini, le réseau repasse en phase de configuration (set-up). La consommation d'énergie pour chaque nœud lors de l'envoi et de la réception d'un K paquet est égale à ce qui suit :

$$E_{Transmettre} = (E_{elec} \times n \text{ Bytes}) + (n \text{ Byte} \times E_{amp} \times d^2) ;$$

$$E_{Recevoir} = (E_{elec} \times n \text{ Bytes}) ; \quad (3.8)$$

Ou :

- $E_{Transmettre}$: L'énergie nécessaire pour envoyer un paquet.
- $E_{Recevoir}$: L'énergie nécessaire pour recevoir un paquet.

- E_{elec} : L'énergie électronique.
- E_{amp} : Puissance d'amplification.
- d : Distance de transmission.
- n : la taille d'un message en octets.

Fonctionnement de l'approche proposé

La figure 3.5, illustre le fonctionnement du protocole proposé.

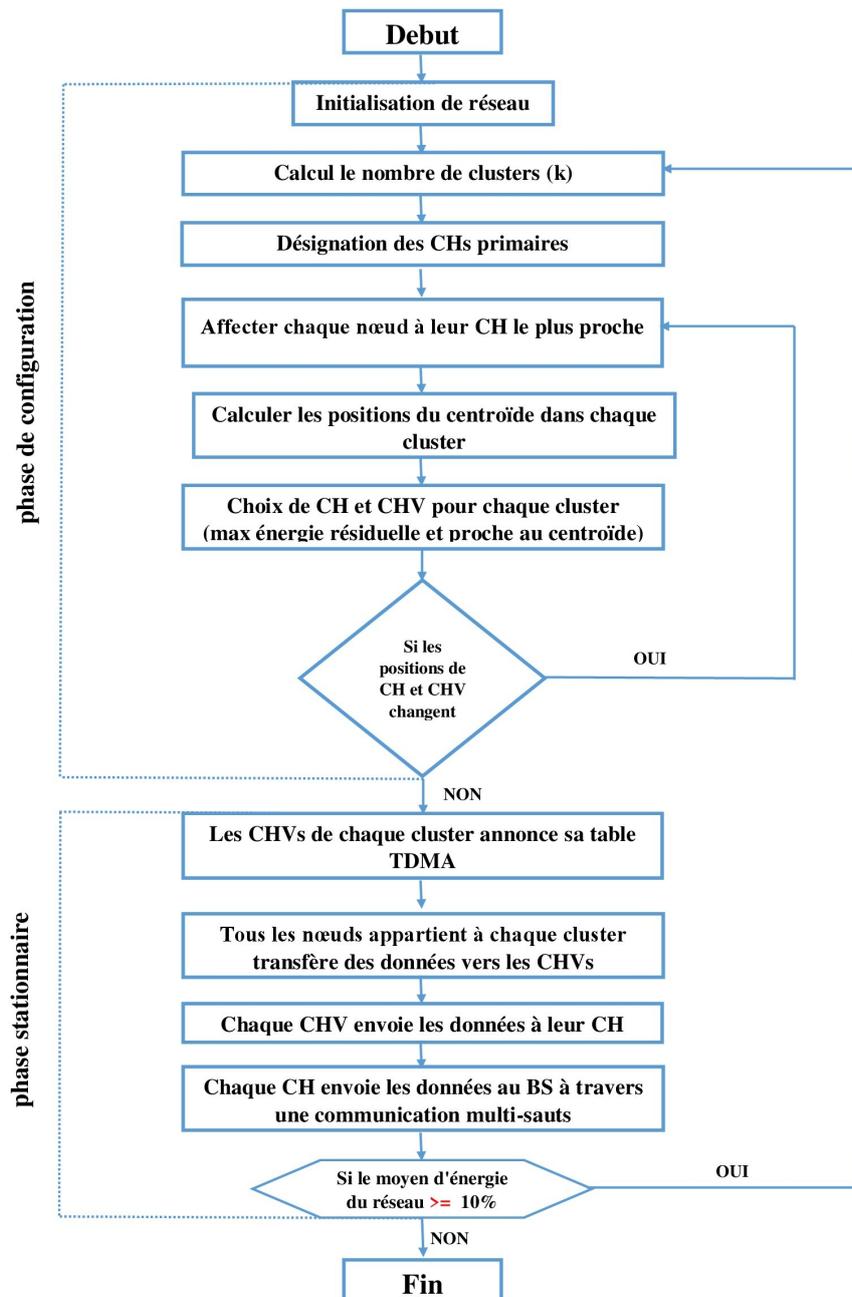


FIGURE 3.5 – Le schéma de fonctionnement de l'approche proposé

3.3.1 L'algorithme proposé

Algorithme : choix de CH et CHV.

- **Étape 1** : Initialisation du réseau.
- **Étape 2** : Calcul de k (le nombre de clusters des nœuds vivants).
- **Étape 3** : Désignation des CHs primaires.
- **Étape 4** : Assignment des nœuds à leur cluster head le plus proche.
- **Étape 5** : Calcul du le centroïde pour chaque cluster.
- **Étape 6** : Choix de CH et CHV selon les fonctions de fitness.
Si $\text{fitness}(i)$ est supérieur à celui des autres nœuds $[(i + 1), (i + 2)] \dots$ dans le même cluster, sera le noeud qui a le max fitness
CHV sera le noeud qui a le 2ème max.
- **Étape 7** : Répétition de l'étape 4,5,6 jusqu'à les CHs et CHVs ne bougent plus.
- **Étape 8** : Récupération d'énergie = $\text{pow}(6,-7)$ joule.
- **Étape 9** : Communication en phase stationnaire.
- **Étape 10** : vérifier la condition de reconfiguration. Si oui, augmenter le round et aller à l'étape 2. Sinon aller à fin.
- **Fin.**

3.3.2 Les avantages de l'algorithme proposé

Aucun CH ne gaspille ses ressources en gardant une trace de ses membres. Il se concentre uniquement sur la transmission et la réception de données. Les nœuds sont à tour de rôle le chef de cluster. En conséquence, la consommation d'énergie de chaque nœud est réduite et la fiabilité du réseau s'améliore.

Nous avons proposé un algorithme qui peut effectuer efficacement le clustering et l'agrégation de données en utilisant deux cluster heads au sein d'un cluster. Cette méthodologie nous a aidés à allonger le cycle de vie des chefs de cluster et nous avons pu réduire le trafic des messages de routage dans le réseau.

l'algorithme proposé utilise l'approche de trois types de nœuds (CH, CHV, nœud). Choix de CH et CHV basée sur le positionner de centroïde dans le cluster et l'énergie

résiduelle la plus élevée au sein du cluster. Ainsi, les nœuds à haute énergie, ont plus de chances d'être sélectionnés comme CH et CHV que les nœuds à faible énergie.

3.3.3 Comparaison

Le tableau 3.1 compare entre les travaux connexes et l'algorithme proposé.

Protocoles	Algorithmes	Scalabilité	Le nb de sauts	paramètres de sélection	Méthode Clustering	double chef
MDCH-PSO, 2020 [63]	PSO	moyen	Multi saut	energie , distance	Distribué	oui
DHSC, 2010 [66]	max-min	faible	un seul saut	energie , couverture	Centralisé	oui
PSOMV, 2011 [72]	PSO	moyen	Multi saut	energie , distance	Centralisé	oui
PSO-DH, 2011 [73]	PSO	moyen	Multi saut	energie , distance	Distribué	oui
K-LEACH, 2020 [55]	k-means	haute	un seul saut	energie , distance	Centralisé	non
VAP-DCH, 2013 [68]	probabilité	haute	Multi saut	energie , distance	Centralisé	oui
DCHM, 2015 [69] [70]	max-min	haute	Multi saut	énergie résiduelle	Centralisé	oui
DL-LEACH, 2016 [71]	probabilité	moyen	Multi saut	energie , distance	Distribué	non
DCHRP	k-means	haute	Multi saut	distance , energie	Centralisé	oui

TABLE 3.1 – Comparaison entre certaines approches de clustering

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé l'algorithme proposé « DCHRP » pour améliorer les performances énergétiques et augmenter efficacement la durée de vie du RCSF. Nous avons présenté les avantages de cet algorithme et nous avons effectué une comparaison et un examen des travaux connexes qui ont tenté de développer et de suggérer des solutions possibles. On va présenter dans le dernier chapitre les détails d'implémentation.

Analyse expérimentale

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéressera à la simulation et l'analyse de notre protocole de routage proposé (DCHRP). Nous allons tout d'abord présenter les différents outils et langages utilisés. Ensuite, nous allons présenter une étude comparative entre l'approche proposé et deux autres approches. Nous allons présenter les résultats sous forme de graphes.

4.2 Environnements de travail

4.2.1 Environnement matériel

Pour réaliser ce travail, on a utilisé un ordinateur HP EliteBook 8470p, Intel Core i5-3320M, RAM 4 Go, Système d'exploitation Linux Mint 19.3 Tricia 64 bits.

4.2.2 Environnement logiciel

Xed Text Editor

Xed est un éditeur de texte léger qui permet d'éditer plusieurs fichiers texte dans une seule fenêtre à l'aide d'onglets. Il utilise l'encodage Unicode UTF-8 pour s'adapter pleinement au texte et prend en charge la plupart des fonctionnalités d'éditeur standard, tout en mettant l'accent sur la simplicité et la facilité d'utilisation.

Network simulator (NS-3)

Network Simulator 3 [76] est un outil utilisé pour simuler le réseau du monde réel sur un ordinateur en écrivant des scripts en C++ ou Python. La simulation de réseau est une technique par laquelle un logiciel modélise le comportement d'un réseau, soit en calculant l'interaction entre les caractéristiques du réseau à l'aide de formules mathématiques, soit en capturant et en reproduisant les observations d'un réseau réel.

Github

GitHub est un outil de contrôle de version et de collaboration basé sur le Web. Ce service en ligne de type SaaS (Software as a Service) [77] permet de stocker le code source d'un projet et de suivre l'historique complet de toutes les modifications qui y ont été apportées. Il fournit des outils pour gérer les modifications potentielles contradictoires de plusieurs développeurs, permettant aux développeurs de travailler avec plus de succès sur un projet.

4.2.3 Langages de programmation utilisés

Langage C++

Le langage C++ [78] apparut au début des années 90, langage de programmation utilisé par plusieurs développeurs, notamment en ce qui concerne les applications de bureau. Il permet d'aborder le développement sous plusieurs paradigmes : programmation générique, procédurale et orienté objet.

Langage python

Python a été créé au début des années 1990 par Guido Van Rossum au CWI (centre national de recherches) [79]. Il est un langage de programmation puissant et facile à apprendre. Il dispose de structures de données de haut niveau et permet une approche simple mais efficace de la programmation orientée objet. Parce que sa syntaxe est élégante, que son typage est dynamique et qu'il est interprété, Python est un langage idéal pour l'écriture de scripts et le développement rapide d'applications dans de nombreux domaines et sur la plupart des plateformes.

4.3 Simulation et analyse des resultats

4.3.1 Les hypothèses et les paramètre de simulation

L'analyse comparative des différents protocoles est réalisée à l'aide du simulateur ns-3. le tableau 4.1 présente les paramètres de conception détaillés, l'énergie de démarrage de tous les nœuds est fixée à 1 J. chaque nœud consomme une énergie de 50 nJ/bit pour une communication active impliquant l'émetteur-récepteur du nœud. le réseau initial est de 100m x 100m avec une station de base (puits) installée à la position (10, 0). Nous utiliserons trois scénarios en ce qui concerne le nombre de nœuds (N), la surface de déploiement et Position de la station de base.

	Paramètres	Valeurs (Test 1)	Valeurs (Test 2)	Valeurs (Test 3)
1	Nombre de nœuds	100	100	200
2	Énergie initiale	1 J	1 J	1 J
3	Surface de déploiement	100m x 100m	200m x 200m	200m x 200m
4	Taille d'un paquet de données	250 Byte	250 Byte	250 Byte
5	Transmission d'énergie par byte	50 nJ	50 nJ	50 nJ
6	Recevoir de l'énergie par byte	50 nJ	50 nJ	50 nJ
7	Amplification	100 pJ/bit/ m ²	100 pJ/bit/ m ²	100 pJ/bit/ m ²
8	Position de la station de base	(10,0)	(200,200)	(300,300)

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

4.3.2 Les approches comparées

La simulation est fait pour le protocole LEACH et le protocole K-LEACH [55] et notre protocole de routage proposé (DCHRP). Pour le protocole proposé, nous avons fait la simulation pour deux valeur de k (nombre de clusters) on note DCHRP-K10 pour k égale 10% des neouds vivants et par DCHRP-K5 5% des neouds vivants. Donc en résultat, nous comparons entre quatre approches.

4.3.3 Critères de comparaison

Critère 1 :

La durée de vie d'un RCSF est l'intervalle de temps entre le déploiement du réseau jusqu'à l'énergie moyenne du réseau atteint 10%.

Critère 2 :

La durée de vie d'un RCSF est l'intervalle de temps entre le déploiement du réseau jusqu'à la mort d'un premier noeud.

4.3.4 Critères de performance**le nombre de rounds :**

Est le nombre de configurations possibles jusqu'à la mort de réseau.

4.3.5 Comparaison et analyse des approches par le Critère 1

Leach donné le pire résultat des trois protocoles dans les trois tests, On observe que l'énergie de LEACH se diminue rapidement, et d'une manière non régulière par rapport au k-leach et DCHRP (DCHRP-K10 , DCHRP-K5). Ça revient effectivement au choix aléatoire des CH dans LEACH qui peut être accompagnée d'une distribution irrégulière des nœuds élus. Dans le cas où les CHs sont des voisins ou situés à la frontière du réseau, les communications intra cluster effectuées par les nœuds membres éloignés de leur CHs exigent un cout très élevé pour la transmission de paquets de contrôle, ce qui cause un grand gaspillage de l'énergie.

k-leach et DCHRP (DCHRP-K10 , DCHRP-K5) allège le problème en utilisant l'algorithme "k-means" de qui donne une meilleur partition, ce qu'il donne une conservation meilleure de l'énergie. Notre algorithme proposé 'DCHRP' donne le meilleur résultat dans les trois tests car il a CHV par apport à k-leach, CHV qui gère la collecte, la compression et l'agrégation d'informations dans le cluster. qui conduit à réduira considérablement le fardeau de CH, ce qu'il donne une meilleure conservation de l'énergie.

DCHRP-K10 donné le meilleur résultat par apport à DCHRP-K5 dans les trois tests, parce que choisir un nombre approprié des chefs fournir un débit élevé d'énergie et une faible latence. Durée de vie du réseau rounds pour les trois protocoles dans le tableau 4.2 :

Test	Protocole	le nombre de rounds
Test 1	LEACH	2367
	K-LEACH	6989
	DCHRP-k :5%	7665
	DCHRP-k :10%	8709
Test 2	LEACH	727
	K-LEACH	1850
	DCHRP-k :5%	2650
	DCHRP-k :10%	3363
Test 3	LEACH	442
	K-LEACH	510
	DCHRP-k :5%	887
	DCHRP-k :10%	904

TABLE 4.2 – Comparaison d'énergie résiduelle pour les trois tests

Les trois figures 4.1, 4.2 et 4.3 représentent comparaison d'énergie moyenne versus le nombre de rounds pour les protocoles dans les trois tests.

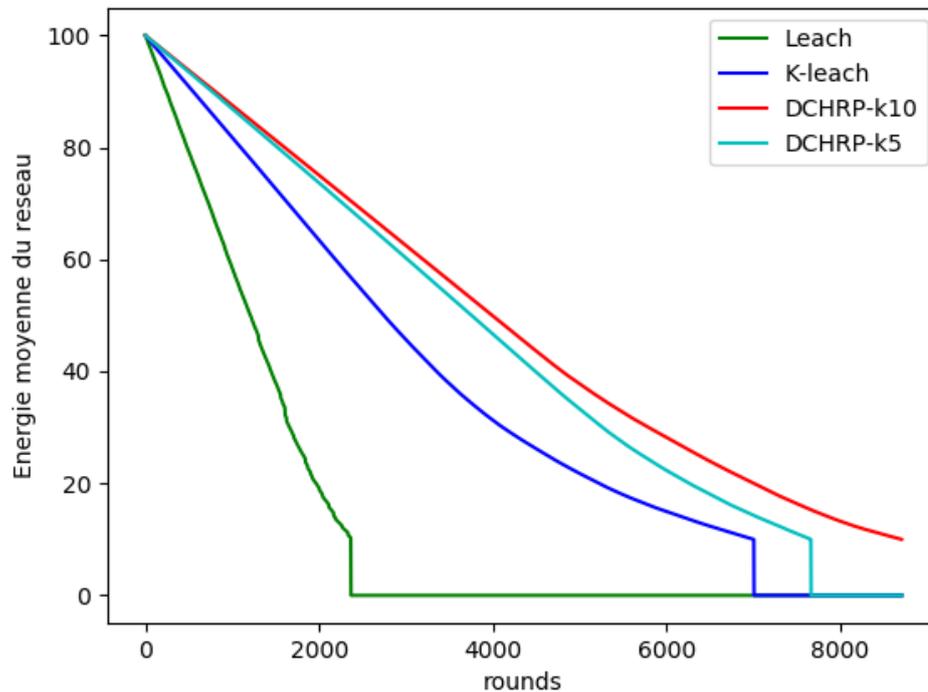


FIGURE 4.1 – Test 01 : Nombre total de rounds vs l'énergie moyenne du réseau

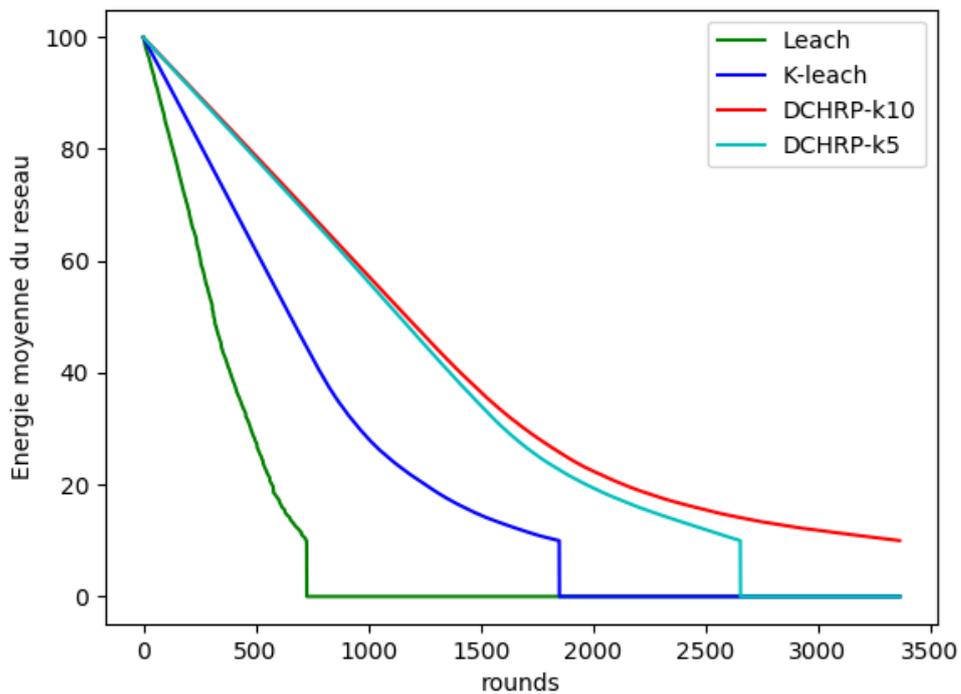


FIGURE 4.2 – Test 02 : Nombre total de rounds vs l'énergie moyenne du réseau

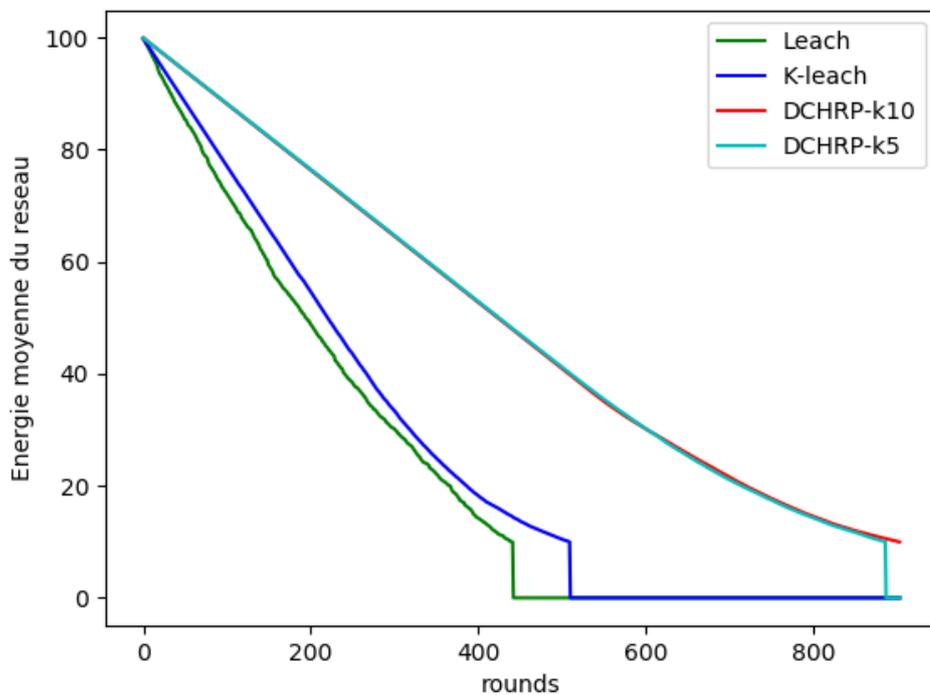


FIGURE 4.3 – Test 03 : Nombre total de rounds vs l'énergie moyenne du réseau

4.3.6 Comparaison et analyse des approches par le Critère 2

Dans cette section, nous s'intéresser à analyser les comportements des approches considérées dans notre simulation par la 2eme définition de la durée de vie d'un RCSF (critère2). Nous considérons comme critère de performance le nombre de reconfigurations (rounds) jusqu'à la mort du premier nœud. Nous obtenons les résultats illustrés dans le tableau 4.3.

Test	Protocole	le nombre de rounds
Test 1	LEACH	1135
	K-LEACH	2731
	DCHRP-k :5%	4110
	DCHRP-k :10%	4556
Test 2	LEACH	170
	K-LEACH	832
	DCHRP-k :5%	1316
	DCHRP-k :10%	1252
Test 3	LEACH	25
	K-LEACH	303
	DCHRP-k :5%	540
	DCHRP-k :10%	517

TABLE 4.3 – Comparaison par le premier nœud qui morte pour les trois tests

Les trois figures 4.4, 4.5 et 4.6 représentent comparaison la mort d'un premier noeud versus le nombre de rounds pour les protocoles dans les trois tests.

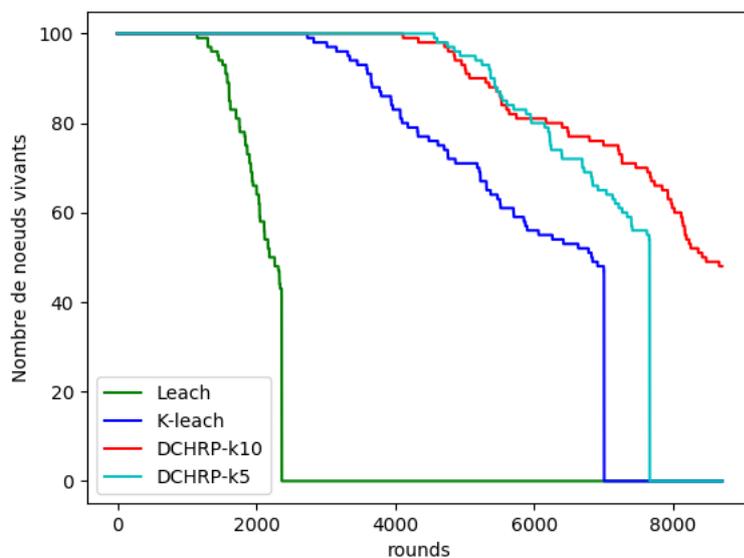


FIGURE 4.4 – Test 01 : Nombre total de rounds(%) vs le premier nœud qui morte

La figure 4.4 présente le nombre de rounds vs le premier nœud qui morte dans le test 1 : Nous remarquons que LEACH est le premier protocole à perdre le premier nœud, suivi de K-LEACH, suivi de DCHRP-k5, la durée de vie du réseau lors de l'utilisation de DCHRP-k10 est 9% meilleure que DCHRP-k5 et 40% meilleure que K-LEACH et 75% meilleure que LEACH.

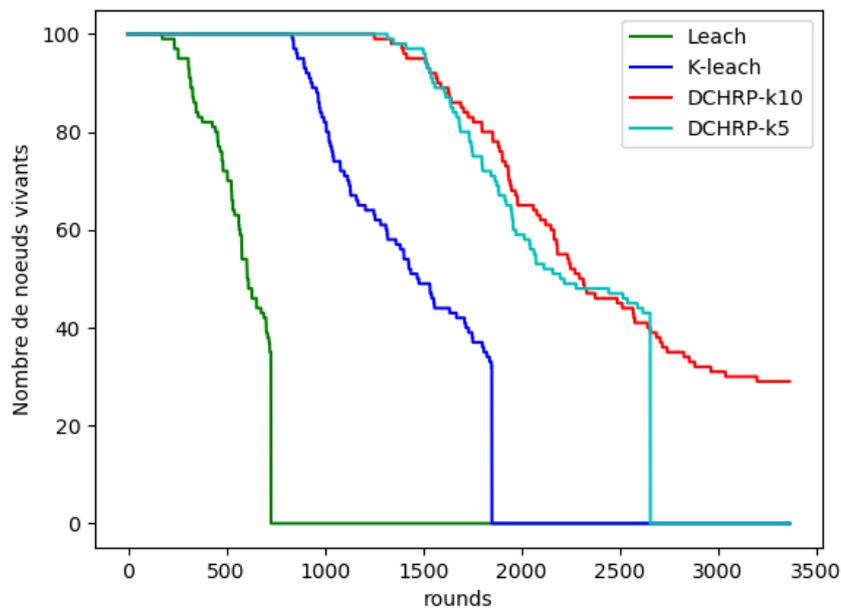


FIGURE 4.5 – Test 02 : Nombre total de rounds(%) vs le premier nœud qui morte

La figure 4.5 présente le nombre de rounds vs le premier nœud qui morte dans le test 2 : nous avons utilisé 100 nœuds dans plus surface de déploiement avec repositionner de la station de base plus loin qu'avant, LEACH a été le premier protocole à perdre le premier nœud, suivi de K-LEACH, suivi de DCHRP-k10, la durée de vie du réseau lors de l'utilisation de DCHRP-k5 est 4% meilleure que DCHRP-k10 et 36% meilleure que K-LEACH et 87% meilleure que LEACH.

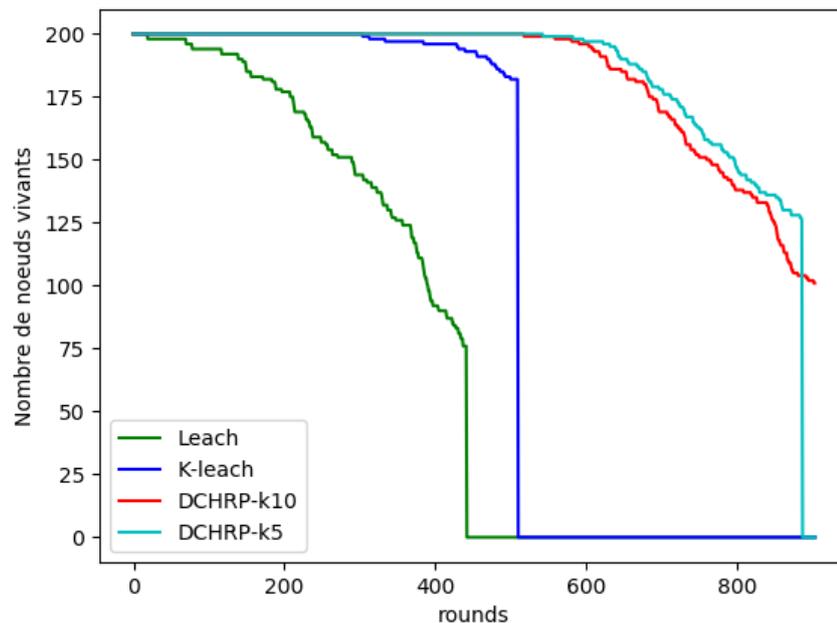


FIGURE 4.6 – Test 03 : Nombre total de rounds(%) vs le premier nœud qui morte

La figure 4.6 présente le nombre de rounds vs le premier nœud qui morte dans le test 3 : nous avons utilisé 200 nœuds avec repositionner de la station de base en dehors de Surface de déploiement. LEACH est le premier protocole à perdre le premier nœud, suivi de K-LEACH, suivi de DCHRP-k10, la durée de vie du réseau lors de l'utilisation de DCHRP-k5 est 4% meilleure que DCHRP-k10 et 43% meilleure que K-LEACH et 90% meilleure que LEACH.

D'après ces résultats, le protocole proposé DCHRP était le meilleur à maintenir le plus long temps possible sans perdre aucun nœud, DCHRP-K10 donné le meilleur résultat par apport à DCHRP-K5 dans le premier test, parce que la position de station de base était proche des chefs de clusters, Pour ce qui est des derniers deux tests, DCHRP-K5 donné le meilleur résultat par apport à DCHRP-K10 parce que la position de station de base était loin des chefs de cluster. Ceci est dû à l'effet du nombre des chefs des clusters sur la consommation d'énergie dans le réseau.

4.4 Conclusion

Les résultats de simulation prouvent que l'adaptation du protocole LEACH avec la méthode de clustering K-Means avec a double chefs de cluster prolonger la durée de vie du réseau et améliore l'efficacité énergétique, ce qui augmente le taux de survie des nœuds, ses performances dépassent celles de LEACH et K-LEACH en termes de quantité de données transmises à la station de base et la durée de vie de réseaux.

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sont un sujet d'étude en plein essor qui peut être utilisé dans une variété des domaines. Cependant, il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans ce secteur. La consommation d'énergie est l'un des problèmes que l'on peut rencontrer dans ce type de réseau. Par conséquent, la conservation de l'énergie de ces capteurs reste un problème de recherche ouvert.

Nous avons conclu que la plage de transmission et le nombre différent de nœuds de capteurs en tant que paramètre du système affectent la consommation d'énergie globale et l'efficacité du RCSF. Nous avons simulé le fonctionnement du protocole LEACH avec une adaptation au niveau de la phase de clustering en ajoutant des K-MEANS en utilisant deux têtes au sein d'un cluster a été simulé avec NS-3. Afin de valider les performances de ce protocole, nous l'avons comparé avec le protocole LEACH de base et le protocole K-MEANS-LEACH. La simulation montre que le DCHRP proposé donne de bons résultats dans la plupart des cas en termes de nombre de rondes, de données transmises au BS, d'énergie résiduelle et de nombre de nœuds vivants, par conséquent une extension de la durée de vie du réseau.

Bibliographie

- [1] Site web. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01750619v2/document/>.
- [2] Site web. <http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/Bunel/Presentation.html/>.
- [3] Abhishek Deb, Akhil N Gaikwad, and Mrs Vandana CP. A survey on analogy on wireless sensor networks. 2016.
- [4] Samir Athmani. *Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2010.
- [5] Basilis Mamalis, Damianos Gavalas, Charalampos Konstantopoulos, and Grammati Pantziou. Clustering in wireless sensor networks. *RFID and sensor networks : architectures, protocols, security and integrations*, pages 324–353, 2009.
- [6] Hanane Kalkha, Hassan Satori, and Khalid Satori. Performance evaluation of aodv and leach routing protocol. *Advances in Information Technology : Theory and Application*, 1(1) :112–118, 2016.
- [7] Sunil Kumar Singh, Prabhat Kumar, and Jyoti Prakash Singh. A survey on successors of leach protocol. *Ieee Access*, 5 :4298–4328, 2017.
- [8] Omojokun G Aju. A survey of zigbee wireless sensor network technology : Topology, applications and challenges. *International Journal of Computer Applications*, 130(9) :47–55, 2015.
- [9] Diksha Sharma and Neeraj Kumar. A review on machine learning algorithms, tasks and applications. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 6(10) :2278–1323, 2017.

- [10] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 38(4) :393–422, 2002.
- [11] Yacine Challal. Réseaux de capteurs sans fils. *Cours, Systèmes Intelligents pour le Transport, Université de Technologie de Compiègne, France*, 17, 2008.
- [12] Yaser Yousef. *Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Mulhouse, 2010.
- [13] AHMED SEDDIK BENHAMIDOUICHE. *LA COUVERTURE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL*. PhD thesis, FACULTE DES MATHEMATIQUES ET DE L'INFORMATIQUE-UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2017.
- [14] Nouredine Lasla. La gestion de clés dans les réseaux de capteurs sans-fil. *Mémoire de Magister, Institut National de formation en Informatique (INI), Oued-Smar, Alger*, 2007.
- [15] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine*, 40(8) :102–114, 2002.
- [16] Rahim Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, 2009.
- [17] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal processing magazine*, 19(2) :40–50, 2002.
- [18] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, and Andrea Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks : A survey. *Ad hoc networks*, 7(3) :537–568, 2009.
- [19] Dongmei Yan, JinKuan Wang Li Liu, Bin Wang, and Peng Xu. Topology control algorithm based on overlapping clustering. In *2010 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, pages 737–741. IEEE, 2010.
- [20] Kofi Sarpong Adu-Manu, Nadir Adam, Cristiano Tapparello, Hoda Ayatollahi, and Wendi Heinzelman. Energy-harvesting wireless sensor networks (eh-wsns) a review. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 14(2) :1–50, 2018.

- [21] Raul Morais, Samuel G Matos, Miguel A Fernandes, António LG Valente, Salviano FSP Soares, PJSG Ferreira, and MJCS Reis. Sun, wind and water flow as energy supply for small stationary data acquisition platforms. *Computers and electronics in agriculture*, 64(2) :120–132, 2008.
- [22] GP Ramesh and A Rajan. Microstrip antenna designs for rf energy harvesting. In *2014 International Conference on Communication and Signal Processing*, pages 1653–1657. IEEE, 2014.
- [23] Alan Fahrenbruch and Richard Bube. *Fundamentals of solar cells : photovoltaic solar energy conversion*. Elsevier, 2012.
- [24] Winston KG Seah, Zhi Ang Eu, and Hwee-Pink Tan. Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (wsn-heap)-survey and challenges. In *2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*, pages 1–5. Ieee, 2009.
- [25] Gongbo Zhou, Linghua Huang, Wei Li, and Zhencai Zhu. Harvesting ambient environmental energy for wireless sensor networks : a survey. *Journal of Sensors*, 2014, 2014.
- [26] Hongyun Yu, Yanqiu Li, Yonghong Shang, and Bo Su. Design and investigation of photovoltaic and thermoelectric hybrid power source for wireless sensor networks. In *2008 3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, pages 196–201. IEEE, 2008.
- [27] Marco Virili, Apostolos Georgiadis, Kyriaki Niotaki, Ana Collado, Federico Alimenti, Paolo Mezzanotte, Luca Roselli, and Nuno Borges Carvalho. Design and optimization of an antenna with thermo-electric generator (teg) for autonomous wireless nodes. In *2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA)*, pages 21–25. IEEE, 2014.
- [28] Akretche Lydia and Arezki Nabila. *Implémentation et simulation d’un algorithme de routage plat pour les RCSF Cas : «Diffusion Directe»*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2015.

- [29] Laouari Rahma and Besline Nassima. *Routage hiérarchique dans les RCSF (Comparaison entre variantes de LEACH)*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [30] Chiara Buratti, Andrea Conti, Davide Dardari, and Roberto Verdone. An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors*, 9(9) :6869–6896, 2009.
- [31] Santiago Figueroa Lorenzo, Javier Añorga Benito, Pablo García Cardarelli, Jon Alberdi Garaia, and Saioa Arrizabalaga Juaristi. A comprehensive review of rfid and bluetooth security : Practical analysis. *Technologies*, 7(1) :15, 2019.
- [32] Zhongmin Pei, Zhidong Deng, Bo Yang, and Xiaoliang Cheng. Application-oriented wireless sensor network communication protocols and hardware platforms : A survey. In *2008 IEEE international conference on industrial technology*, pages 1–6. IEEE, 2008.
- [33] Chirihane Gherbi, Zibouda Aliouat, and Mohamed Benmohammed. A survey on clustering routing protocols in wireless sensor networks. *Sensor Review*, 2017.
- [34] Ameer Ahmed Abbasi and Mohamed Younis. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer communications*, 30(14-15) :2826–2841, 2007.
- [35] Namhoon Kim, Jongman Heo, Hyung Seok Kim, and Wook Hyun Kwon. Reconfiguration of clusterheads for load balancing in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 31(1) :153–159, 2008.
- [36] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences*, pages 10–pp. IEEE, 2000.
- [37] Lalita Yadav and Ch Sunitha. Low energy adaptive clustering hierarchy in wireless sensor network (leach). *International journal of computer science and information technologies*, 5(3) :4661–4664, 2014.
- [38] Bao Zhenshan, Xue Bo, and Zhang Wenbo. Ht-leach : An improved energy efficient algorithm based on leach. In *Proceedings 2013 International Conference on Mecha-*

- tronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)*, pages 715–718. IEEE, 2013.
- [39] Lyes Khelladi and Nadjib Badache. Les réseaux de capteurs : état de l’art. *Rapport de recherche, Algérie*, 2004.
- [40] Boulfekhar Samra. *Approches de minimisation d’énergie dans les réseaux de capteurs*. PhD thesis, Université de Béjaïa-Abderrahmane Mira.
- [41] Juntao Wang and Xiaolong Su. An improved k-means clustering algorithm. In *2011 IEEE 3rd international conference on communication software and networks*, pages 44–46. IEEE, 2011.
- [42] Guorong Xuan, Wei Zhang, and Peiqi Chai. Em algorithms of gaussian mixture model and hidden markov model. In *Proceedings 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No. 01CH37205)*, volume 1, pages 145–148. IEEE, 2001.
- [43] K Sasirekha and P Baby. Agglomerative hierarchical clustering algorithm-a. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 83(3) :83, 2013.
- [44] Baoli Li, Shiwen Yu, and Qin Lu. An improved k-nearest neighbor algorithm for text categorization. *arXiv preprint cs/0306099*, 2003.
- [45] Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, Xiaowei Xu, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *kdd*, volume 96, pages 226–231, 1996.
- [46] Antonin Guttman. R-trees : A dynamic index structure for spatial searching. In *Proceedings of the 1984 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, pages 47–57, 1984.
- [47] Shraddha K Popat and M Emmanuel. Review and comparative study of clustering techniques. *International journal of computer science and information technologies*, 5(1) :805–812, 2014.
- [48] Site web. [https://www.geeksforgeeks.org/ml-hierarchical-clustering-agglomerative-and-#:~:text=The%20time%20complexity%20of%20a,0\(n2logn\)./](https://www.geeksforgeeks.org/ml-hierarchical-clustering-agglomerative-and-#:~:text=The%20time%20complexity%20of%20a,0(n2logn)./).

- [49] Ting Su and Jennifer G Dy. In search of deterministic methods for initializing k-means and gaussian mixture clustering. *Intelligent Data Analysis*, 11(4) :319–338, 2007.
- [50] Zhenyun Deng, Xiaoshu Zhu, Debo Cheng, Ming Zong, and Shichao Zhang. Efficient knn classification algorithm for big data. *Neurocomputing*, 195 :143–148, 2016.
- [51] Youssef Benabbassi. *Application de la redondance pour la surveillance par réseau de capteurs sans fil : Cas du réseau de capteurs image sans fil*. PhD thesis, Université de Mascara, 2014.
- [52] Duc Truong Pham, Stefan S Dimov, and Chi D Nguyen. Selection of k in k-means clustering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, 219(1) :103–119, 2005.
- [53] Geon Yong Park, Heeseong Kim, Hwi Woon Jeong, and Hee Yong Youn. A novel cluster head selection method based on k-means algorithm for energy efficient wireless sensor network. In *2013 27th international conference on advanced information networking and applications workshops*, pages 910–915. IEEE, 2013.
- [54] Mohamed Elshrkawey, Samiha M Elsherif, and M Elsayed Wahed. An enhancement approach for reducing the energy consumption in wireless sensor networks. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 30(2) :259–267, 2018.
- [55] Sabrina Guemmadi. *Adaptation de clustering phase de protocole de routage «LEACH» pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université laarbi tebessi tebessa, 2020.
- [56] Indranil Gupta, Denis Riordan, and Srinivas Sampalli. Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks. In *3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR'05)*, pages 255–260. IEEE, 2005.
- [57] Wendi B Heinzelman, Anantha P Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 1(4) :660–670, 2002.

- [58] MJ Handy, Marc Haase, and Dirk Timmermann. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. In *4th international workshop on mobile and wireless communications network*, pages 368–372. IEEE, 2002.
- [59] Seema Bandyopadhyay and Edward J Coyle. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. In *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No. 03CH37428)*, volume 3, pages 1713–1723. IEEE, 2003.
- [60] Ossama Younis and Sonia Fahmy. Heed : a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, 3(4) :366–379, 2004.
- [61] Ya Xu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 70–84, 2001.
- [62] Ya Xu, John Heidemann, and Deborah Estrin. Energy conservation by adaptive clustering for ad-hoc networks. *Poster Session of MobiHoc 2002*, pages 255–263, 2002.
- [63] T Preethiya, A Muthukumar, and S Durairaj. Double cluster head heterogeneous clustering for optimization in hybrid wireless sensor network. *Wireless Personal Communications*, 110(4) :1751–1768, 2020.
- [64] Wang Linping, Bi Wu, Cai Zhen, and Wang Zufeng. Improved algorithm of pegasis protocol introducing double cluster heads in wireless sensor network. In *2010 international conference on computer, mechatronics, control and electronic engineering*, volume 1, pages 148–151. IEEE, 2010.
- [65] Qiao Xuegong et al. A control algorithm based on double cluster-head for heterogeneous wireless sensor network. In *2010 2nd International Conference on Industrial and Information Systems*, volume 1, pages 541–544. IEEE, 2010.
- [66] Xiao Yi and Lu Deng. A double heads static cluster algorithm for wireless sensor networks. In *2010 The 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, volume 2, pages 635–638. IEEE, 2010.

- [67] Da Tang, Xiang Liu, Yuqian Jiao, and Qianjin Yue. A load balanced multiple cluster-heads routing protocol for wireless sensor networks. In *2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology*, pages 656–660. IEEE, 2011.
- [68] Dexin Ma, Jian Ma, and Pengmin Xu. A clustering protocol based on virtual area partition using double cluster heads scheme for wireless sensor networks. In *2013 IEEE Third International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, pages 1447–1450. IEEE, 2013.
- [69] Jun-Song Fu and Yun Liu. Double cluster heads model for secure and accurate data fusion in wireless sensor networks. *Sensors*, 15(1) :2021–2040, 2015.
- [70] R Ananth and S Karthikeyan. Dual cluster head algorithm for proficient routing in wireless sensor networks. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(43) :1–7, 2016.
- [71] Hui Li and Jing Liu. Double cluster based energy efficient routing protocol for wireless sensor network. *International Journal of Wireless Information Networks*, 23(1) :40–48, 2016.
- [72] Hu Yu and Wang Xiaohui. Pso-based energy-balanced double cluster-heads clustering routing for wireless sensor networks. *Procedia Engineering*, 15 :3073–3077, 2011.
- [73] Zhang Ruihua, Jia Zhiping, Li Xin, and Han Dongxue. Double cluster-heads clustering algorithm for wireless sensor networks using pso. In *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pages 763–766. IEEE, 2011.
- [74] Zhaoxia Wu, Youjin Nie, Shuqiang Chen, Huifang Zhang, and Lifu Wang. Double layers clustering algorithm based on cpso for wireless sensor networks. *Information Technology Journal*, 11(12) :1737, 2012.
- [75] P Visu, T Suriya Praba, Nagarajan Sivakumar, R Srinivasan, and T Sethukarasi. Bio-inspired dual cluster heads optimized routing algorithm for wireless sensor networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(3) :3753–3761, 2021.
- [76] Gustavo Carneiro. Ns-3 : Network simulator 3. In *UTM Lab Meeting April*, volume 20, pages 4–5, 2010.

- [77] Laura Dabbish, Colleen Stuart, Jason Tsay, and Jim Herbsleb. Social coding in github : transparency and collaboration in an open software repository. In *Proceedings of the ACM 2012 conference on computer supported cooperative work*, pages 1277–1286, 2012.
- [78] Marius Vasiliu. *Le langage C++*. Pearson Education France, 2005.
- [79] Xavier Dupré. Langage python.
- [80] Shikha Magotra and Krishan Kumar. Detection of hello flood attack on leach protocol. In *2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, pages 193–198. IEEE, 2014.
- [81] Shilpa Mahajan, Jyoteesh Malhotra, and Sandeep Sharma. An energy balanced qos based cluster head selection strategy for wsn. *Egyptian Informatics Journal*, 15(3) :189–199, 2014.