

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - BBA
Faculté des Mathématiques et Informatiques



MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en Informatique

Spécialité : Réseaux & Multimédias

Thème

Une Approche Efficace de Clustering pour Améliorer les Performances dans l'IoT, basée sur les Réseaux de Capteurs Sans Fil.

Présenté par :

- BENYAHIA Khadidja
- BENGUEDDOUDJ Amina

Soutenu le : 20/06/2024, devant la commission d'examen suivante :

Dr. Safa ATTIA	MCB - Université de BBA	Présidente
Dr. Hacina BENSEFIA	MCB - Université de BBA	Examinatrice
Dr. Oussama SENOUCI	MCB - Université de BBA	Encadrant

Promotion 2023 / 2024

**“Je n’ai jamais rêvé de succès,
J’ai travaillé pour ça.”**

- Estee Lauder -

Remerciements

Nous remercions avant tout ALLAH de nous avoir donné la force de terminer notre travail. Nous exprimons notre sincère gratitude et nos remerciements à notre encadrant, Dr. SENOUCI OUSSAMA, pour ses efforts inestimables, avec les plus hautes expressions de louange et d'appréciation.

Nous remercions également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

En guise de reconnaissance, nous tenons à exprimer nos remerciements sincères à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, au bon déroulement de nos stages de fin d'études et à l'élaboration de ce modeste travail. Nous sommes profondément reconnaissants envers tous les professeurs pour la qualité de leur enseignement, leurs précieux conseils, et l'intérêt incontestable qu'ils portent à tous les étudiants.

Nous remercions également l'ensemble du personnel pour leur patience, leurs conseils avisés, et le suivi attentif qu'ils ont apporté à nos travaux. Dans l'impossibilité de citer tous les noms, nous adressons nos remerciements sincères à toutes celles et ceux qui, par leurs conseils et compétences, ont permis la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous tenons à remercier tout le corps professoral de l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi pour le travail immense qu'il accomplit afin de nous offrir les conditions les plus favorables au bon déroulement de nos études. Merci à tous.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mon père, « rahimaho Allah », que j'ai toujours voulu qu'il partage cette joie. Mais je suis reconnaissante d'avoir suivi ses volontés malgré son absence ;

À ma mère, ma source d'inspiration et de force. Je vous remercie pour votre patience et votre dévouement ;

À mes sœurs et à mon frère "Anes", qui ont toujours été présents pour moi. Je suis reconnaissante de vous avoir dans ma vie ;

À petit Mohamed ;

À mes amis, pour les moments inoubliables passés ensemble et pour votre soutien ;

À toute ma famille ;

À mon binôme Khadidja, pour ton soutien indéfectible et ton esprit d'équipe ;

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude pour ma persévérance et mon engagement envers la réalisation de mes objectifs.

★ Amina ★

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes chers parents,
pour tous Leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse,
leur soutien et leurs prières tout au long de mes études ;
À mes chers frères et sœurs, ceux qui ont partagé avec moi tous les moments
d'émotion lors de la réalisation de ce travail ;
À toute ma famille ;
À tous mes amies ;
À mon binôme Amina, pour ton aide précieuse et ta collaboration sans faille ;
À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.*

★ Khadidja ★

Résumé

Ce mémoire de fin d'études vise à améliorer la gestion des données dans le domaine de l'Internet des objets en proposant une approche de clustering adaptatif pour les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). L'objectif principal est de concevoir, modéliser et simuler un nouvel algorithme de clustering répondant aux exigences spécifiques de ces réseaux.

Pour ce faire, la recherche commence par une analyse critique de la littérature concernant les algorithmes de clustering existants dans le contexte des RCSF. Cette étape vise à identifier les lacunes et les opportunités d'amélioration. Ensuite, nous proposons un nouvel algorithme de clustering qui optimise les performances globales du réseau en formant des clusters et en sélectionnant les chefs de cluster de manière optimale grâce à l'introduction de poids.

Chaque capteur du réseau calcule individuellement ces poids en tenant compte de divers paramètres tels que la longueur de la file d'attente, l'énergie restante et la distance moyenne entre les nœuds. L'objectif ultime est de réduire la consommation d'énergie du réseau, d'améliorer son efficacité d'accès et d'augmenter le taux de transmission de données entre les capteurs.

Une analyse détaillée et une simulation complète ont été réalisées en utilisant l'outil de simulation MATLAB pour évaluer l'algorithme proposé. Les résultats démontrent l'efficacité de cette approche par rapport aux algorithmes existants dans la littérature spécialisée.

Mots clés : RCSF, IoT, Clustering, Pondérés, CH, CM, CG, EE-WCA.

Abstract

This graduation thesis aims to enhance data management in the Internet of Things domain by proposing an adaptive clustering approach for wireless sensor networks (WSN). The main objective is to design, model, and simulate a new clustering algorithm to meet the specific requirements of these networks.

To achieve this, the research begins with a critical analysis of the literature concerning existing clustering algorithms in the context of WSN. This step aims to identify gaps and opportunities for improvement. Next, we propose a new clustering algorithm that optimizes the overall network performance by forming clusters and selecting cluster heads optimally through the introduction of weights.

Each sensor in the network individually calculates these weights, considering various metrics such as buffer length, remaining energy, and average distance between nodes. The ultimate objective is to reduce the network's energy consumption, enhance its access efficiency, and increase the data transmission rate among sensors.

We conducted a detailed analysis and comprehensive simulation using the MATLAB simulation tool to evaluate the proposed algorithm. The results demonstrate the effectiveness of this approach compared to existing algorithms in the specialized literature.

Keywords : WSN, IoT, Clustering, Weighted, CH, CM, CG, EE-WCA.

ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى تحسين إدارة البيانات في مجال إنترنت الأشياء من خلال اقتراح نهج تجميع تكيفي لشبكات الاستشعار اللاسلكية. الهدف الرئيسي هو تصميم وتطوير ومحاكاة خوارزمية تجميع جديدة لتلبية المتطلبات الخاصة بهذه الشبكات.

لتحقيق ذلك، تبدأ الدراسة بتحليل نقدي للأدبيات المتعلقة بخوارزميات التجميع الحالية في سياق شبكات الاستشعار اللاسلكية. تهدف هذه الخطوة إلى تحديد الثغرات والفرص لتحسين الأداء. بعد ذلك، نقترح خوارزمية تجميع جديدة تعمل على تحسين الأداء العام للشبكة من خلال تشكيل مجموعات واختيار رؤساء المجموعات بشكل أمثل عبر إدخال أوزان مخصصة.

يقوم كل مستشعر في الشبكة بحساب هذه الأوزان بشكل فردي، مع مراعاة معايير مختلفة مثل سعة التخزين المؤقت (الذاكرة)، الطاقة المتبقية، والمسافة المتوسطة بين العقد. الهدف النهائي هو تقليل استهلاك الطاقة في الشبكة، وتحسين كفاءة الوصول، وزيادة معدل نقل البيانات بين المستشعرات. قمنا بإجراء تحليل مفصل ومحاكاة شاملة باستخدام أداة المحاكاة ماتلاب لتقييم الخوارزمية المقترحة. تظهر النتائج فعالية هذا النهج مقارنة بالخوارزميات الحالية في الأدبيات المتخصصة.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية، إنترنت الأشياء، التجميع، موزون ، رئيس المجموعة، أعضاء المجموعة، بوابة المجموعة ،خوارزمية التجميع الموزونة الموفرة للطاقة.

Table des matières

Liste des figures	xiii
Liste des tables	xiv
Abréviations	xv
Introduction Générale	1
1 Généralités sur le Contexte	4
1.1 Introduction	4
1.2 Architecture d'un Capteur	4
1.2.1 Composants Matériels d'un Capteur	5
1.2.2 Caractéristiques Principales	6
1.2.3 Structure Logicielle (Stack Protocolaire) d'un Capteur	7
1.3 Réseaux de Capteurs sans Fil pour l'IoT	9
1.4 Caractéristiques et Contraintes des RCSF pour l'IoT	10
1.4.1 Support de Transmission et Bande Passante	13
1.4.2 Couverture et Connectivité	13
1.4.3 Consommation d'Énergie	13
1.5 Localisation et Positionnement des Capteurs	14
1.5.1 Positionnement des Capteurs	14
1.5.2 Localisation des Capteurs	14
1.5.3 Techniques de Localisation et de Positionnement	15
1.5.3.1 Différence du Temps d'Arrivée (TDOA)	15
1.5.3.2 Heure d'Arrivée (TOA)	15
1.5.3.3 Angle d'Arrivée (AOA)	16

1.5.3.4	Force du Signal (RSSI)	16
1.5.4	Dérivation des Positions	17
1.5.4.1	Triangulation	17
1.5.4.2	Trilatération	17
1.5.4.3	Multilatération	18
1.6	Domaines d'Application des RCSF pour l'IoT	19
1.6.1	Domaine Militaire	20
1.6.2	Domaine Environnemental	21
1.6.3	Domaine Commercial	21
1.6.4	Domaine Médical	21
1.6.5	Domaine Domotique	22
1.6.6	Domaine Industriel	22
1.6.7	Domaine Agricole	22
1.6.8	Domaine de la Sécurité et Surveillance	22
1.6.9	Gestion des Ressources Urbaines	23
1.7	Conclusion	23
2	État de l'art	24
2.1	Introduction	24
2.2	Fondements et Caractéristiques du Clustering dans les RCSF basé sur l'IoT	25
2.2.1	Principes et Concepts du Clustering	25
2.2.1.1	Structure de Cluster	26
2.2.1.2	Métriques pour l'élection des CH	27
2.2.1.3	Processus d'élection des CH	28
2.2.1.4	Agrégation des Données	28
2.2.1.5	Communications Inter-Cluster et Intra-Cluster	28
2.2.1.6	Flux procédural du Processus de Clustering	29
2.2.1.7	Mesures de performance pour les algorithmes de clus- tering	31
2.3	Approches des algorithmes de Clustering	32
2.3.1	Approche centralisée	32
2.3.2	Approche distribuée	32

2.4	Méthodologie de recherche	32
2.5	Classification des Algorithmes de Clustering pour les Réseaux IoT	33
2.5.1	Algorithmes de clustering basés sur des métriques aléatoires	34
2.5.1.1	LEACH	34
2.5.1.2	k-means	34
2.5.1.3	URDFL	35
2.5.1.4	RRCEH	35
2.5.2	Algorithmes de clustering basés sur la position	35
2.5.2.1	LEACH-C	36
2.5.2.2	CHP	36
2.5.2.3	LE-KCR	37
2.5.2.4	PSO	37
2.5.3	Algorithmes de clustering basés sur l'énergie	38
2.5.3.1	CEC	38
2.5.3.2	TEEECH	38
2.5.3.3	FPSTERP	39
2.5.3.4	EEUCB	39
2.5.4	Algorithmes de clustering basés sur la pondération	40
2.5.4.1	EE-WCA	40
2.5.4.2	WCHSA	41
2.5.4.3	K-WCH	41
2.5.4.4	EWCP	42
2.5.5	Algorithmes de clustering basés sur la destination	42
2.5.5.1	LBRP	42
2.5.5.2	TACM	43
2.5.5.3	SOPR	43
2.5.5.4	IMCMR-UWSN	44
2.5.6	Discussion	44
2.6	Conclusion	45
3	Contribution	46
3.1	Introduction	46
3.2	Algorithme EE-WCA	46

3.2.1	Avantages de l'algorithme EE-WCA	49
3.2.2	Limitations de l'algorithme EE-WCA	50
3.3	Approche proposée : A-EE-WCA	51
3.3.1	Hypothèses	52
3.3.2	Description générale et les objectifs de l'approche proposée : A-EE-WCA	52
3.3.3	Description détaillée de l'approche proposée : A-EE-WCA	53
3.3.3.1	Types de nœuds utilisés dans notre approche	53
3.3.3.2	Notations	54
3.3.3.3	Types de messages	54
3.3.3.4	Déroulement de l'algorithme	54
3.3.4	Exemple illustratif de L'approche proposée A-EE-WCA	61
3.3.5	Avantages de notre approche A-EE-WCA	62
3.3.6	Validation théorique	63
3.3.6.1	Étude de la complexité des messages échangés pour l'algorithme A-EE-WCA	64
3.3.6.2	Propriétés de clustering	66
3.4	Conclusion	67
4	Simulation & Évaluation	68
4.1	Introduction	68
4.2	Environnement de simulation	68
4.2.1	Configuration matérielle de la machine de simulation	69
4.2.2	Présentation du langage MATLAB	69
4.2.2.1	Fonctionnalités du langage Matlab	70
4.2.2.2	Boîtes à outils (toolbox) MATLAB pour la simulation des RCSF	70
4.2.3	Métriques d'évaluation	71
4.3	Évaluation des Performances	71
4.3.1	Choix des coefficients	72
4.3.2	Résultats et Analyses	72
4.3.2.1	Durée de Vie du Réseau	73
4.3.2.2	Efficacité énergétique	74

4.3.2.3	Taux de réussite de livraison de paquets (PDR)	74
4.3.2.4	Surcharge de clustering	75
4.4	Discussion & Directions Futures	76
4.5	Conclusion	77
	Conclusion Générale	79
	Bibliographie	81

Table des figures

1.1	Architecture d'un capteur sans fil.	5
1.2	Structure Logicielle Stack Protocolaire d'un Capteur.	8
1.3	Architecture du RCSF pour l'IoT.	10
1.4	Principe de la triangularisation.	17
1.5	Principe de la trilatération.	18
1.6	Principe de la multilatération.	19
1.7	Domaines d'Application des RCSF pour l'IoT.	20
2.1	Exemple de structure d'un cluster.	26
2.2	Métriques utilisés dans la phase d'élection des CH.	27
2.3	Flux procédural de clustering.	30
2.4	Taxonomie des algorithmes de clustering pour les RCSF pour l'IoT. . .	33
3.1	Organigramme de l'algorithme EE-WCA.	47
3.2	Architecture de réseau pour l'approche proposée.	51
3.3	Diagramme de séquence d'identification des nœuds.	56
3.4	Diagramme de séquence de découverte de voisinage.	57
3.5	Diagramme de séquence de l'élection de CH, l'annonce et l'affiliation. .	58
3.6	Exemple montrant la phase de formation du cluster.	63
3.7	Transition d'état des nœuds.	67
4.1	Répartition des nœuds et de la BS.	73
4.2	État final des clusters avec les CH et leurs CM.	74
4.3	Durée de vie du réseau.	75
4.4	Efficacité énergétique.	76
4.5	Taux de réussite de livraison de paquets (PDR).	77
4.6	Surcharge de clustering.	78

Liste des tableaux

2.1	Comparaison des algorithmes de clustering basés sur des métriques aléatoires.	36
2.2	Comparaison des algorithmes de clustering basés sur la position.	38
2.3	Comparaison des algorithmes de clustering basés sur l'énergie.	40
2.4	Comparaison des algorithmes de clustering basés sur la pondération.	42
2.5	Comparaison des algorithmes de clustering basés sur la destination.	44
3.1	Notations utilisées dans cette approche.	54
3.2	Types de messages dans cette étude.	55
3.3	Paramètres des nœuds.	62
4.1	Paramètres de Simulation.	72

Abréviations

IoT : Internet of Things

RCSF : Réseau de Capteurs Sans Fil

GPS : Global Positioning System

ISM : Industrial, Scientific and Medical

TOA : Time of Arrival

TDOA : Time Difference of Arrival

RSSI : Received Signal Strength Indicator

AOA : Angle of Arrival

GSM : Global System for Mobile Communications

CH : Cluster Head

CM : Cluster Member

CG : Cluster Gateway

BS : Base Station

LEACH : Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

URDFL : Uniform Randomly Distributed Fuzzy Logic

RRCEH : Random Relay Coordination and Energy Harvesting

EHWSN : Energy Harvesting Wireless Sensor Networks

LEACH-C : Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy - Centralized

CHP : Cluster Head Positioning

LE-KCR : Low-Energy K-Coverage Routing

PSO : Particle Swarm Optimization

CEC : Cross-layer Energy based Clustering

TEEECH : Threshold-based Energy Efficient Clustering and Hierarchical routing

FPSTERP : FPA-based Stable Threshold-Sensitive Energy-Efficient

FPA : Flower pollination algorithm

EEUCB : Energy-Efficient Unequal Clustering Scheme based on Balanced Energy

Method

EE-WCA : Energy Efficient Weighted Clustering Algorithm

WCHSA : Weighted Cluster Head Selection Algorithm

K-WCH : K-Weighted Cluster Head Selection

EWCP : Energy-efficient weighted multi-level Clustering Protocol

LBRP : Location-Based Routing Protocol

TACM : Tracking-anchor-based clustering method

RFCM : Rough-Fuzzy C Means

SOPR : Secure Optimal Path Routing

WBAN : Wireless Body Area Network

BEER : Balanced and Reliable Energy Efficiency

IMCMR-UWSN : Integrated Multi-Cluster Multi-Route for Underwater Wireless Sensor Networks

CKHA : Chaotic krill head algorithm

SA-GSO : Self-adaptive glow worm swarm optimization algorithm

UN : unclustered

A-EE-WCA :Advanced Energy Efficient Weighted Clustering Algorithm

CC : Cloud Computing

NCC : Network Control Center

PDR :Packet Delivery Success Rate

Introduction Générale

Dans le domaine de l'Internet des objets (IoT), les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) jouent un rôle essentiel en facilitant la collecte et la transmission continues de données à partir de divers environnements. Notre étude s'est concentrée sur la conception, la modélisation et la simulation de nouvelles méthodes d'assemblage dans ce domaine spécifique. Dans l'introduction de ce document, nous commencerons par exposer les motivations et les problématiques à l'origine de cette recherche, puis nous détaillerons les objectifs visés et les contributions apportées par ce mémoire. Enfin, nous offrirons un aperçu complet de la structure de ce manuscrit.

Problématique & Motivations

Au cœur de ce projet se trouve le défi de gérer de manière efficace les vastes et diverses quantités de données générées par l'IoT. Cette abondance de données soulève la question fondamentale de leur organisation et de leur exploitation efficace pour répondre aux besoins spécifiques des applications IoT. Les approches traditionnelles visant à améliorer les performances ne sont pas toujours adaptées à la nature changeante et volumineuse des données IoT, caractérisées par leur variabilité et leur évolution constante. Par conséquent, un système de clustering performant devient essentiel pour regrouper intelligemment ces données, les structurer et les rendre utilisables pour des applications spécifiques. L'objectif est d'identifier des schémas, des relations ou des regroupements significatifs au sein des données IoT afin de faciliter une exploitation optimale, améliorant ainsi la prise de décision, la performance des applications et la gestion des ressources.

La motivation de ce projet découle de la nécessité urgente d'améliorer les perfor-

mances générales dans le contexte de l'IoT, basée sur les réseaux de capteurs sans fil. En mettant en place une méthode de clustering spécifiquement adaptée aux RCSF, l'objectif est de surmonter le défi fondamental de l'IoT : comment organiser, structurer et exploiter ces données pour en tirer un réel avantage ? En permettant une classification intelligente et une compréhension des schémas sous-jacents aux données IoT, cette approche aspire à optimiser l'utilisation de ces informations diverses et dynamiques, contribuant ainsi à l'évolution et à la performance globale de l'IoT.

Objectifs & Contributions

Dans ce mémoire, plusieurs objectifs interdépendants sont définis. Premièrement, il ambitionne de présenter une approche innovante et efficace de clustering pour améliorer les performances dans les RCSF de l'IoT. En regroupant les nœuds de capteurs en clusters cohérents, cette approche vise à faciliter l'agrégation et l'analyse des données, réduisant ainsi la charge de communication et optimisant l'utilisation des ressources du réseau.

De plus, ce mémoire s'engage à enrichir la littérature en fournissant une analyse approfondie des algorithmes de clustering existants pour les RCSF de l'IoT. En identifiant les lacunes et les défis actuels, il pose les bases d'une nouvelle approche de clustering adaptée aux besoins spécifiques de ces réseaux.

La contribution principale de ce mémoire réside dans la proposition d'une nouvelle approche de clustering, appelée A-EE-WCA , spécialement conçue pour les RCSF de l'IoT. Cette approche, élaborée à partir de recherches approfondies et d'observations empiriques, vise à optimiser les performances du réseau en termes de consommation d'énergie, de latence de communication et de qualité de service.

Une analyse et une simulation ont été effectuées pour évaluer l'algorithme proposé en utilisant MATLAB, et les résultats ont démontré une amélioration par rapport aux algorithmes de base présentés dans la littérature.

Organisation du mémoire

Le mémoire est organisé en quatre chapitres distincts, chacun traitant d'un aspect spécifique de notre travail :

— **Chapitre 1 : Généralités sur le Contexte**

Ce chapitre offre des généralités sur le contexte de notre travail, décrivant l'architecture des RCSF, leurs caractéristiques uniques ainsi que les défis auxquels ils font face, tels que les ressources limitées et la topologie dynamique. De plus, nous explorons leurs domaines d'application dans l'IoT, soulignant leur importance croissante dans des secteurs variés comme l'agriculture, la santé et l'industrie.

— **Chapitre 2 : État d'art**

Dans ce chapitre, nous présentons une étude approfondie de l'état de l'art des algorithmes de clustering dans les RCSF de l'IoT. Nous proposons une nouvelle taxonomie de classification basée sur différentes mesures pertinentes pour les RCSF. En utilisant cette taxonomie, nous classifions et analysons un ensemble d'algorithmes de clustering récemment proposés dans la littérature. Notre objectif est d'identifier les lacunes dans les approches existantes et de proposer de nouvelles stratégies de clustering adaptées aux besoins spécifiques des RCSF de l'IoT.

— **Chapitre 3 : Contribution**

Ce chapitre présente notre contribution principale : une amélioration de l'algorithme de clustering EE-WCA, spécifiquement conçu pour les RCSF dédiés à l'IoT. Nous exposons en détail sa conception et expliquons comment il cible l'amélioration des performances du réseau tout en répondant aux besoins particuliers de l'IoT, tels que la préservation de l'énergie et la gestion des ressources. De plus, nous incluons une validation théorique incluant une étude de complexité et une vérification des propriétés de clustering.

— **Chapitre 4 : Simulation & Évaluation**

Ce chapitre présente une analyse et une simulation approfondies réalisées pour évaluer l'algorithme amélioré à l'aide de MATLAB. Nous avons utilisé un simulateur de réseau à cette fin. Les résultats démontrent une amélioration significative par rapport aux algorithmes de base précédemment évoqués dans la littérature.

Chapitre 1

Généralités sur le Contexte

1.1 Introduction

Dans le contexte de l’IoT, les RCSF jouent un rôle crucial en facilitant la collecte et la transmission continues de données provenant de divers environnements. Ces réseaux se caractérisent par leur capacité à être déployés de manière aléatoire ou déterministe dans une zone d’intérêt, sans nécessiter une infrastructure préalable. Les nœuds capteurs, également appelés simplement capteurs, se configurent de manière automatique pour constituer le RCSF. Par la suite, ces nœuds capteurs détectent et transmettent de manière autonome des données environnementales à une entité spécifique désignée comme station de base (BS). Ce premier chapitre expose l’architecture d’un capteur, en mettant en relief les caractéristiques et les contraintes cruciales à prendre en compte pour toute solution destinée aux RCSF. De plus, il présente les techniques de localisation et de positionnement des capteurs dans ce type de réseaux. Enfin, le chapitre aborde de manière non exhaustive la classification des domaines d’application des RCSF dans le domaine de l’IoT, offrant ainsi un aperçu concis et informatif du monde captivant des capteurs modernes.

1.2 Architecture d’un Capteur

L’architecture d’un capteur est adaptable en fonction de ses buts et des technologies employées, englobant habituellement des composants essentiels. Cette diversité de conception garantit une fonctionnalité adaptée aux besoins précis, sous-tendant la

variabilité des capteurs.

1.2.1 Composants Matériels d'un Capteur

Un nœud capteur comprend quatre composants fondamentaux : l'unité de capture, de traitement, de communication et de contrôle d'énergie. En fonction de son utilisation, il peut intégrer des modules supplémentaires, tel que le système de localisation GPS (Global Positioning System) ou le générateur d'énergie solaire. Certains capteurs plus imposants peuvent également comporter un module de mobilité pour déplacer le nœud si nécessaire. Ces composants offrent une adaptabilité aux besoins variés des applications, qu'il s'agisse de surveillance environnementale, d'IoT ou d'autres domaines [1].

La Figure 1.1 montre les différents composants d'un nœud capteur.

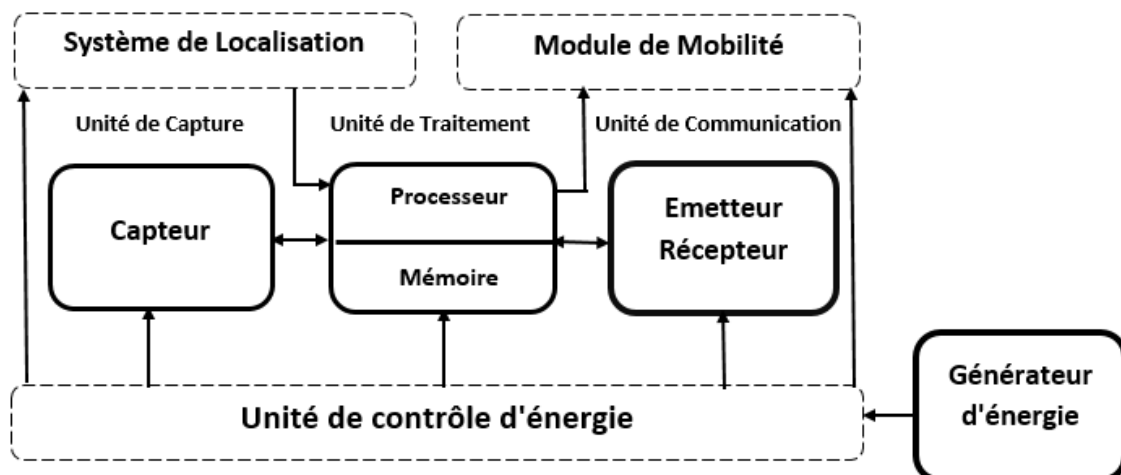


FIGURE 1.1 – Architecture d'un capteur sans fil.

Pour être plus précis, chaque composant joue un rôle spécifique [2] :

1. **Unité de capture** : Sa fonction de saisir le phénomène observé, le convertissant d'un signal analogique à un signal numérique, avant de le transmettre à l'unité de calcul. Elle joue un rôle crucial en convertissant les données brutes en un format numérique traitable pour l'analyse ultérieure.
2. **Unité de traitement** : Située au cœur du capteur, elle est responsable de la réalisation des protocoles de communication nécessaires pour permettre une

interaction collaborative entre les nœuds capteurs au sein du réseau. Son objectif est de répondre de manière efficace à des requêtes spécifiques en orchestrant la coopération entre les divers nœuds.

3. **Unité de communication** : Chargée d'orchestrer toutes les transmissions de données, qu'il s'agisse d'émissions ou de réceptions. Son rôle central dans le capteur assure une gestion efficace des flux d'information, contribuant ainsi à la connectivité et à la coordination au sein du réseau.
4. **Unité de contrôle d'énergie** : Assume la responsabilité de superviser la réserve énergétique du capteur et de mesurer sa durée de vie. Cette fonction essentielle contribue à une gestion efficiente de l'énergie, optimisant ainsi les performances et la durabilité du capteur.
5. **Système de localisation** : Offre des données précises sur la position du nœud capteur, facilitant ainsi le suivi et la cartographie précise des emplacements. Cette fonctionnalité joue un rôle clé dans les applications nécessitant une connaissance spatiale des capteurs.
6. **Mobilisateur** : Activé en fonction du type de réseau, intervenant lorsque le déplacement du capteur est nécessaire pour accomplir sa mission spécifique. Cette fonctionnalité permet d'optimiser la collecte de données en ajustant la position du capteur en réponse aux besoins évolutifs du système.
7. **Générateur d'énergie** : Récupère l'énergie de l'environnement extérieur, telle que l'énergie solaire, permettant au capteur de rester opérationnel pendant des mois, voire des années, sans nécessiter d'intervention humaine. Alors que la recharge des batteries est généralement pratique pour les dispositifs sans fil traditionnels comme les téléphones portables ou les ordinateurs portables, cela devient un défi dans un RCSF, où le remplacement de la batterie peut être difficile, voire impossible, dans certaines applications.

1.2.2 Caractéristiques Principales

Le choix du type de capteurs repose sur l'application particulière et l'environnement éventuel pour leur utilisation. Ces dispositifs fournissent une diversité de services, dont les caractéristiques les plus essentielles incluent [3] :

1. **Résilience face aux défaillances** : La capacité d'un système à maintenir son fonctionnement en dépit de pannes matérielles ou logicielles.
2. **Traitement instantané des données** : La rapidité avec laquelle un système de capture peut collecter, traiter et interpréter des données en temps réel.
3. **Capacité d'auto-organisation** : La capacité d'un système à s'adapter automatiquement aux changements, incluant la réorganisation des ressources et l'ajustement aux nouvelles exigences.
4. **Efficacité matérielle en termes de performances** : L'utilisation optimale des ressources, la viabilité économique en termes de coûts d'infrastructure et de maintenance, ainsi que la fourniture de la puissance de calcul nécessaire.
5. **Déploiement aléatoire ou planifié** : La capacité d'un système à être déployé de manière planifiée ou spontanée, en fonction des exigences spécifiques et des environnements dynamiques.

1.2.3 Structure Logicielle (Stack Protocolaire) d'un Capteur

La configuration logicielle d'un capteur revêt une importance capitale en standardisant les échanges entre les différentes parties prenantes, ce qui facilite la compatibilité des produits, qu'ils soient matériels ou logiciels, même entre des fabricants différents. Structuré en cinq couches telles que représentées sur la Figure 1.2, ce modèle est aligné sur les fonctions correspondantes du modèle OSI, tout en incorporant trois couches spécifiquement dédiées à la gestion de la puissance, de la mobilité et des tâches.

L'objectif principal d'un système en couches réside dans la segmentation du problème en différentes strates, chacune représentant un niveau d'abstraction distinct. Chaque couche interagit avec les couches adjacentes, à savoir celle située au-dessus ou en dessous d'elle. Ce schéma permet à chaque couche de solliciter les services des couches sous-jacentes tout en les fournissant à celles situées à un niveau supérieur [2].

Chaque couche a des responsabilités spécifiques dans le processus de communication réseau. Voici une brève introduction à chacune des couches mentionnées [4] :

1. **Couche physique** : La couche physique supervise le transfert d'un bit de l'émetteur au récepteur en utilisant un signal transmis via un support comme un câble coaxial, avec une connexion par un connecteur. Elle est responsable de toutes les

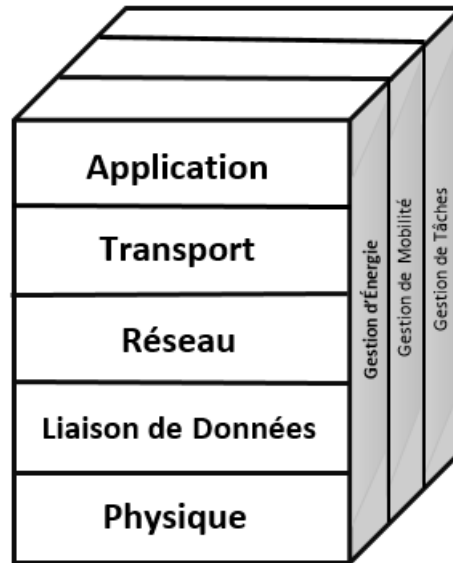


FIGURE 1.2 – Structure Logicielle Stack Protocolaire d'un Capteur.

opérations liées au transfert bout en bout d'un bit. Les bits sont traités spécifiquement à ce niveau, tandis que la couche liaison gère les trames de bits, et les autres couches manipulent les paquets de données.

2. **Couche liaison de données** : Cette strate représente l'interface initiale avec le matériel. Elle englobe des fonctions cruciales, telles que le tramage, le contrôle des erreurs, le contrôle de flux, l'accès au médium partagé, l'adressage physique et le séquençement.
3. **Couche réseau** : La couche réseau est essentielle dans un réseau, assurant des fonctions clés comme l'adressage des machines, le routage des données et la gestion de la congestion. Pour remédier à la surcharge de paquets, comparable à une congestion routière, elle utilise des protocoles agissant de manière similaire à l'utilisation de feux de signalisation et d'autres mesures pour résoudre les problèmes de congestion routière.
4. **Couche transport** : La couche transport assure l'établissement et la libération des connexions, demandées par l'émetteur et acceptées ou rejetées par le récepteur. Elle garantit l'ordonnancement et la réception correcte des données, les segmente pour les volumineuses, et utilise le contrôle de flux. En présence de multiples applications, elle utilise le Multiplexage/Démultiplexage pour acheminer les données aux applications appropriées.

5. **Couche application** : Cette strate englobe une diversité d'applications essentielles à l'utilisateur pour la gestion de son réseau, incluant des fonctionnalités telles que le partage de fichiers et l'envoi de messages à travers le réseau.

Les plans de gestion d'énergie, de mobilité et de tâches représentent les piliers essentiels pour orchestrer avec succès le fonctionnement harmonieux des réseaux de capteurs et des systèmes distribués. Voici une brève introduction à chaque plan [2] :

1. **Plan de gestion d'énergie** : Surveille comment un nœud gère son énergie, en déterminant les méthodes d'optimisation des ressources énergétiques. Son objectif est d'améliorer l'efficacité énergétique du nœud en régulant ses modes d'utilisation et en assurant une utilisation prudente de l'énergie à disposition.
2. **Plan de gestion de mobilité** : Repère et enregistre les déplacements de tous les nœuds capteurs, facilitant une gestion coordonnée et efficiente des ressources au sein des réseaux mobiles. Cette fonction contribue à la traçabilité des mouvements des nœuds, optimisant ainsi la gestion globale du système.
3. **Plan de gestion de tâches** : Garantit une distribution équilibrée des responsabilités entre les nœuds, facilitant une collaboration efficiente pour l'accomplissement des tâches. Cette approche cherche à optimiser les capacités individuelles des nœuds, favorisant une coordination harmonieuse dans l'exécution des travaux attribués.

1.3 Réseaux de Capteurs sans Fil pour l'IoT

L'émergence des RCSF pour l'IoT est stimulée par l'utilisation de circuits intégrés à faible consommation et des communications sans fil. Ces réseaux, composés de nombreux capteurs physiques autonomes répartis dans l'environnement, surveillent diverses conditions telles que la température, comme illustré par la Figure 1.3, le son et la pression. Largement utilisés dans la logistique pour le suivi de la température des marchandises transportées, ainsi que dans les systèmes de surveillance et de maintenance, ces capteurs interconnectés traitent les données en temps réel et coopèrent pour envoyer les informations à un point central [5].

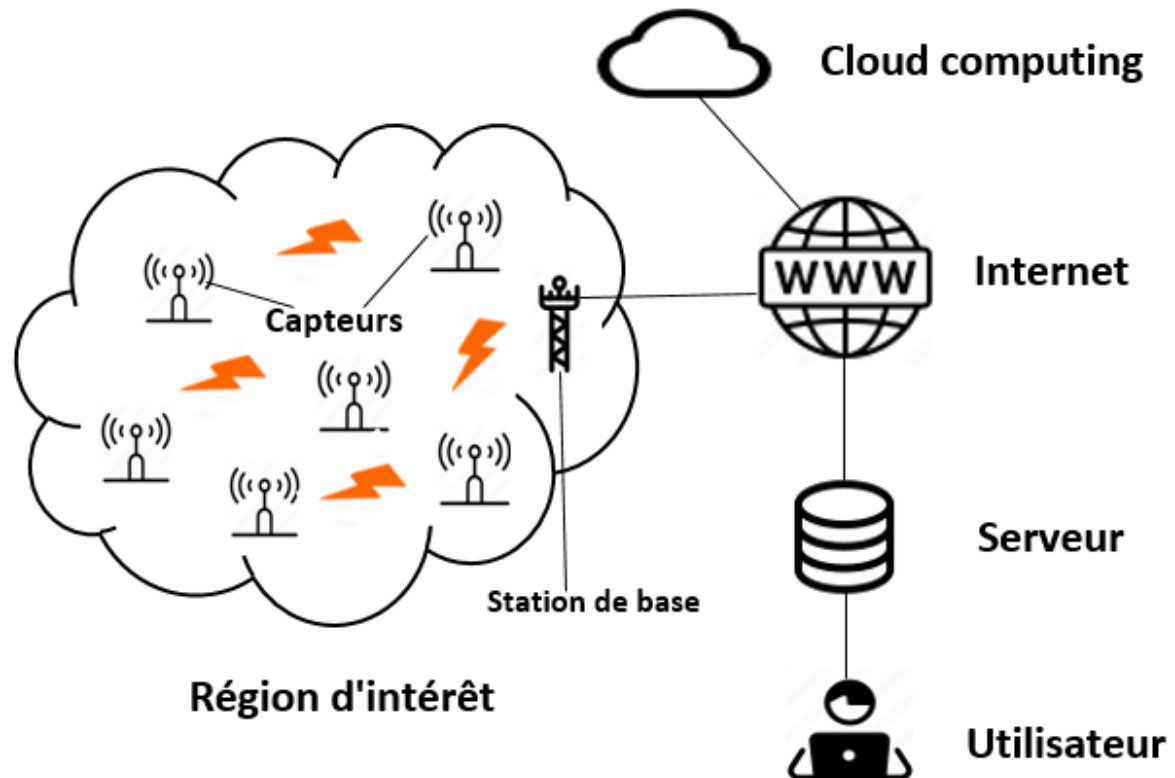


FIGURE 1.3 – Architecture du RCSF pour l'IoT.

1.4 Caractéristiques et Contraintes des RCSF pour l'IoT

Les RCSF occupent une position cruciale au sein de l'IoT, facilitant la collecte, la transmission et le partage d'informations issues d'une variété de capteurs déployés dans des contextes diversifiés. Ces réseaux exhibent des propriétés distinctives ainsi que des contraintes spécifiques qui les distinguent des autres types de réseaux. Ce qui suit constitue une brève introduction sur les particularités et les limitations propres aux RCSF dans le cadre de l'IoT [6] :

1. **Contraintes matérielles :** Résultent de la taille compacte des nœuds capteurs, imposant l'utilisation de batteries de petite taille et, par conséquent, une capacité énergétique limitée. Pour optimiser l'utilisation de l'énergie disponible, ces capteurs font appel à des microcontrôleurs à faible puissance de calcul et à une communication radio à courte portée, créant ainsi des limitations matérielles inhérentes à toute utilisation des capteurs.

2. **Auto-configuration** : Similaire aux réseaux Ad-Hoc, nécessite qu'un RCSF se configure automatiquement en réseau connecté. Chaque capteur doit collaborer avec ses voisins sans intervention humaine, crucial car l'accès aux capteurs est souvent difficile, étant déployés de manière aléatoire dans des zones hostiles. Les problèmes matériels ou logiciels peuvent entraîner des pannes temporaires ou permanentes. Dans un RCSF, la défaillance de certains nœuds ne devrait pas perturber le fonctionnement global, définissant ainsi la tolérance aux pannes. Pour y remédier, les RCSF adoptent la redondance basée sur la densité, assurant la capture et la transmission continues d'informations même en cas de panne d'un nœud. La nécessité d'une tolérance aux pannes élevée varie selon le domaine d'application, étant particulièrement cruciale dans des contextes militaires par rapport à des applications domotiques.
3. **Tolérance aux pannes** : La tolérance aux pannes dans un RCSF s'explique par les problèmes potentiels, tant matériels que logiciels, pouvant causer des pannes ou des blocages temporaires des capteurs. Dans un RCSF, où plusieurs capteurs surveillent un phénomène physique, la défaillance de certains nœuds jusqu'à un certain seuil ne devrait pas perturber le fonctionnement global. Cette mesure de défaillance acceptée définit la tolérance aux pannes du réseau, représentant sa capacité à maintenir une opération normale malgré des défaillances stratégiques. Bien que la plupart des défaillances soient d'origine matérielle, le logiciel peut également entraîner l'arrêt d'un nœud en raison de contraintes mémoire ou de capacités de traitement limitées. Pour atténuer les défaillances, les RCSF intègrent la redondance basée sur la densité, permettant à d'autres nœuds de capturer et transmettre les mêmes informations même en cas de panne d'un nœud. La nécessité d'une tolérance élevée dépend du domaine d'application, avec des exigences plus strictes dans des contextes militaires, nécessitant une adaptation appropriée des protocoles et des algorithmes.
4. **Scalabilité** : Dans les RCSF, la scalabilité est déterminée par la densité des nœuds déployés dans une région pour surveiller un phénomène physique spécifique, une densité qui varie en fonction du type d'application. Certains scénarios nécessitent des centaines voire des milliers de nœuds, imposant ainsi une charge supplémentaire en termes d'évolutivité que les protocoles doivent gérer

pour maintenir une efficacité optimale. La densité peut s'étendre de quelques centaines de nœuds capteurs dans une zone, dont le diamètre peut être inférieur à 10 mètres.

5. **Topologie dynamique des RCSF** : La Topologie dynamique des RCSF est configurée lors du déploiement initial des nœuds capteurs sur le terrain. Ce déploiement est essentiel pour une surveillance efficace du phénomène étudié. De plus, la maintenance post-déploiement est cruciale pour ajuster les paramètres du réseau en fonction de la topologie résultante. Une phase de redéploiement peut s'avérer nécessaire en cas de remplacement de nœuds défectueux.

- (a) **Phase de Déploiement** : Intrinsèquement liée à l'application spécifique en cours. Il peut adopter une approche aléatoire, où les capteurs sont largués en masse par des moyens tels qu'un avion ou projetés par des engins tels que des fusées ou des missiles. Alternativement, le déploiement peut être déterministe, avec des capteurs placés individuellement à des emplacements précis par un humain ou un robot. Cette opération vise à favoriser l'auto-organisation et la tolérance aux pannes, se déroulant sans pré-organisation ou planification préalable.
- (b) **Phase post-déploiement** : La topologie peut évoluer pour diverses raisons, telles que les déplacements des capteurs dans les RCSF mobiles, les interférences, le brouillage, les défaillances des nœuds, ainsi que l'état d'allumage ou d'extinction des nœuds. Ces modifications requièrent des opérations distinctes de celles du déploiement initial, ce qui nécessite une adaptation des protocoles utilisés pour garantir une gestion efficace de la nouvelle configuration du réseau.
- (c) **Phase de redéploiement de capteurs additionnels** : Intervient lorsque la tolérance aux pannes du réseau est dépassée, exigeant ainsi le déploiement de nœuds supplémentaires pour remplacer les capteurs défectueux. Cette démarche implique une reconfiguration du réseau, nécessitant ainsi des protocoles de routage adaptés pour assurer une gestion efficace de la nouvelle configuration.

1.4.1 Support de Transmission et Bande Passante

Jouent un rôle crucial dans les RCSF, où la fiabilité des communications sans fil entre les nœuds est essentielle. Chaque capteur transmet ses données via des liens sans fil à bande passante limitée, établis entre des nœuds intermédiaires, pouvant prendre la forme de liaisons radio, infrarouges, optiques ou acoustiques. Il est impératif d'optimiser le nombre et la taille des messages échangés entre capteurs dans le RCSF, non seulement pour économiser de l'énergie, mais également en raison de la bande passante réduite. Dans un souci d'interopérabilité, on privilégie des supports de communications sans fil disponibles à l'échelle mondiale, tels que les bandes ISM (Industriel, Scientifique et Médical).

1.4.2 Couverture et Connectivité

Représentent des aspects cruciaux de la gestion énergétique efficace des RCSF. L'objectif majeur est d'équilibrer la consommation d'énergie afin de maintenir une couverture optimale de la zone d'intérêt. La couverture implique une surveillance efficace de l'intégralité de la zone géographique tout au long de la durée de vie du réseau, une problématique qui se pose particulièrement dans les RCSF à déploiement aléatoire. Dans de tels cas, la densité des capteurs peut être inégale sur l'ensemble de la zone, exposant les capteurs isolés au risque de déconnexion due à un épuisement rapide de leurs batteries, entraînant des efforts accrus dans la communication. Cela peut induire des changements de topologie et une perte de connectivité. Un réseau de capteurs est considéré comme connecté s'il existe au moins une route entre chaque paire de nœuds. Pour résoudre ces défis, il est essentiel de concevoir des protocoles de routage qui prennent en compte la couverture tout en préservant l'énergie des capteurs, assurant ainsi un effort équilibré de tous les capteurs.

1.4.3 Consommation d'Énergie

La consommation d'énergie dans les capteurs sans fil est déterminée par une source d'énergie limitée, à savoir des batteries ($< 0,5$ Ah, 1,2 V), qui ne sont ni rechargeables ni remplaçables. Par conséquent, la durée de vie du RCSF est étroitement liée à la longévité des batteries. Dans ce contexte, il est essentiel d'analyser soigneusement les

tâches gourmandes en énergie afin de les exécuter de manière optimale. Dans un RCSF, le transfert de données vers la BS se réalise généralement en plusieurs sauts, où chaque nœud assume deux rôles distincts mais complémentaires : celui de capteur source de données et celui de capteur routeur de données.

1.5 Localisation et Positionnement des Capteurs

Le déploiement aléatoire des RCSF nécessite l'utilisation de techniques de localisation pour chaque capteur du réseau. Chaque capteur détermine sa position ou sa localisation pour géoréférencer les événements observés et transmettre efficacement les données vers la BS. Deux approches sont couramment utilisées pour déterminer la position d'un nœud capteur : le positionnement et la localisation des capteurs [6].

1.5.1 Positionnement des Capteurs

La localisation des positions est souvent effectuée à l'aide du GPS. Cependant, son utilisation continue peut consommer beaucoup d'énergie, surtout dans un RCSF mobile qui nécessite un usage fréquent de ce système. Cependant, dans un environnement statique, le GPS peut être envisagé, puisqu'il n'est nécessaire qu'une seule fois pour positionner les capteurs. On peut optimiser l'utilisation du GPS en équipant seulement quelques capteurs d'un module GPS pour déterminer leurs positions géographiques. Ces capteurs transmettent ensuite leurs positions aux nœuds voisins qui, sans GPS, peuvent calculer leur position en s'y référant. Une autre approche consiste à déployer un unique nœud mobile équipé du GPS. Ce dernier parcourt la zone d'intérêt tout en communiquant à chaque étape ses positions aux nœuds voisins, permettant ainsi à ces derniers de calculer leurs positions respectives.

1.5.2 Localisation des Capteurs

La localisation désigne le processus par lequel chaque nœud capteur estime sa position par rapport à un repère. Ce processus requiert souvent le déploiement d'un nombre spécifique de nœuds configurés avec leurs coordonnées géographiques, appelés ancrages, qui peuvent être définis manuellement ou dynamiquement grâce au système

GPS. Pour réaliser cela, la plupart des algorithmes de localisation dans les réseaux de capteurs suivent deux étapes principales :

- **Estimation des distances entre nœuds** : Différentes techniques sont employées pour estimer la distance entre deux nœuds.
- **Dérivation des positions** : À cette étape, les algorithmes de localisation utilisent les estimations de distances entre nœuds obtenues à l'étape précédente, ainsi que les positions des nœuds connues (ancrages), pour calculer les positions des autres nœuds et dresser une carte des positions.

1.5.3 Techniques de Localisation et de Positionnement

Cette section se concentre sur la présentation des diverses méthodes d'estimation des distances entre les capteurs, basées sur l'heure d'arrivée, la différence du temps d'arrivée, l'angle d'arrivée et la force du signal [6, 7].

1.5.3.1 Différence du Temps d'Arrivée (TDOA)

Dans cette méthode, l'émetteur envoie deux signaux distincts, chacun se propageant à une vitesse différente (typiquement des ultrasons et des signaux radio). Ces deux signaux sont reçus par le récepteur à des moments différents, permettant ainsi d'estimer la distance d selon l'Équation 1.1 :

$$d = (V_{\text{radio}} - V_{\text{ultrason}}) \times (t_{\text{ultrason}} - t_{\text{radio}} - t_{\text{delai}}) \quad (1.1)$$

tel que :

- $V_{\text{radio}}, V_{\text{ultrason}}$: Vitesses de propagation des deux signaux.
- $t_{\text{ultrason}}, t_{\text{radio}}$: Temps d'arrivée des deux signaux.
- t_{delai} : Délai entre l'émission des deux signaux.

1.5.3.2 Heure d'Arrivée (TOA)

La méthode TOA exploite la relation entre la distance parcourue par un signal et le temps requis pour son parcours. La distance entre l'émetteur et le récepteur se calcule en multipliant le temps de transit du signal par la vitesse des ondes radio selon

l'équation 1.2 :

$$Distance = Temps \times Vitesse \quad (1.2)$$

La méthode TOA nécessite typiquement des horloges d'une grande précision temporelle pour des mesures exactes, en fonction du type de signal utilisé. Les ondes radio requièrent une haute résolution temporelle, tandis que pour les ondes sonores, bien que moins exigeantes en résolution, leur vitesse de propagation est sujette aux conditions extérieures telles que la température et l'humidité.

1.5.3.3 Angle d'Arrivée (AOA)

Une autre approche de localisation implique la détermination de l'AOA pour chaque signal reçu de chaque nœud environnant. L'AOA est utilisée dans divers systèmes tels que les radars, les réseaux GSM (Global System for Mobile Communications) et les GPS. Cette technologie calcule l'angle entre deux capteurs. Chaque capteur est équipé d'antennes orientées pour évaluer l'angle formé avec un voisin lors de la réception d'un signal. Cet angle est mesuré par rapport à un axe interne au capteur. Cependant, si un capteur est équipé d'une boussole, l'angle peut être mesuré par rapport à l'un des axes cardinaux tels que Nord, Sud ou Ouest.

1.5.3.4 Force du Signal (RSSI)

La localisation par RSSI utilise la force du signal reçu pour estimer les distances entre les nœuds émetteurs et récepteurs, basée sur les ondes radio. Différents modèles existent, dont le plus simple utilise :

$$PR(dBm) = A - 10 \times \log_{10} \times r \quad (1.3)$$

Dans l'équation 1.3, PR représente la puissance de réception du signal sans fil, A est la puissance du signal reçu à un mètre de distance, et r est la distance entre les nœuds émetteurs et récepteurs.

Chaque modèle est adapté à un contexte spécifique. Le RSSI est économique, car il ne requiert aucun équipement supplémentaire, mais il peut être moins précis en raison d'interférences et de la multiplicité des chemins pris par les signaux radio.

1.5.4 Dérivation des Positions

Dans cette section, nous aborderons les méthodes traditionnelles visant à estimer la position des nœuds en se basant sur la distance les séparant des ancres. À noter, les ancres représentent des nœuds dont les coordonnées géographiques sont préalablement connues [8].

1.5.4.1 Triangulation

La méthode de triangulation est mise en œuvre lorsqu'il est possible de mesurer l'angle d'arrivée entre deux nœuds, ce qui est facilité par l'utilisation de la technique AOA. Dans la Figure 1.3, notre objectif est de calculer la distance entre B et C. B représente un point de référence, et A connaît les angles d'arrivée, décrivant le principe de localisation à l'aide des ancres de B et C. La distance $\overline{BC}(d_3)$ peut ainsi être calculée en appliquant une équation trigonométrique 1.4.

$$d_3^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2 \times d_1 \times d_2 \times \cos(\angle ABC) \quad (1.4)$$

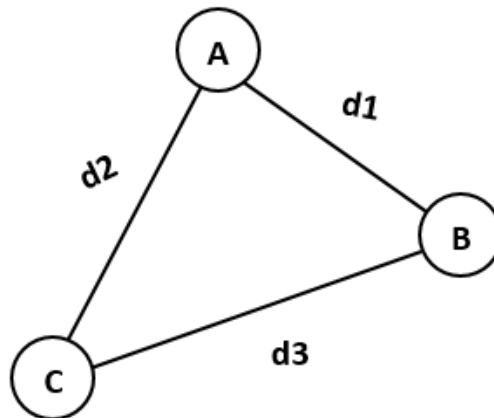


FIGURE 1.4 – Principe de la triangularisation.

Une fois les distances entre les nœuds déterminées, on combine la méthode de triangulation avec la trilatération pour estimer les positions des nœuds.

1.5.4.2 Trilatération

La trilatération est une méthode classique pour estimer la position d'un nœud lorsqu'il utilise trois de ses voisins immédiats (voisins à une étape) comme points de

référence, et que les distances exactes entre ces points et le nœud sont connues. La Figure 1.4 illustre le principe de la trilatération. Le nœud S souhaite estimer sa position en utilisant les coordonnées des points de référence A1, A2 et A3, ainsi que les distances d_1 , d_2 et d_3 le séparant de ces points.

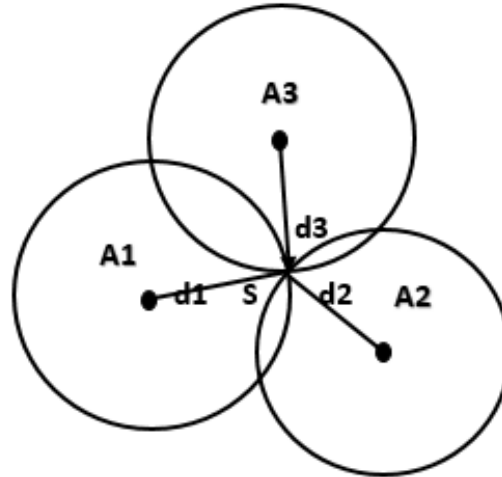


FIGURE 1.5 – Principe de la trilatération.

La résolution du système suivant (Équations :1.5, 1.6 et 1.7) donne la position du nœud S :

$$d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (1.5)$$

$$d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \quad (1.6)$$

$$d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \quad (1.7)$$

En considérant (x_1, y_1) , (x_2, y_2) et (x_3, y_3) comme les coordonnées respectives des ancres A1, A2 et A3.

1.5.4.3 Multilatération

La multilatération étend le concept de la trilatération en utilisant plus de trois capteurs de référence (ancres) pour estimer la position inconnue d'un capteur. Cette méthode calcule la position en se basant sur les distances estimées entre le capteur et plusieurs ancres, comme illustré dans la Figure 1.5. En impliquant davantage que trois ancres, cette technique vise à réduire la marge d'erreur associée à la localisation.

La détermination de la position du nœud S illustré dans la Figure X par le biais

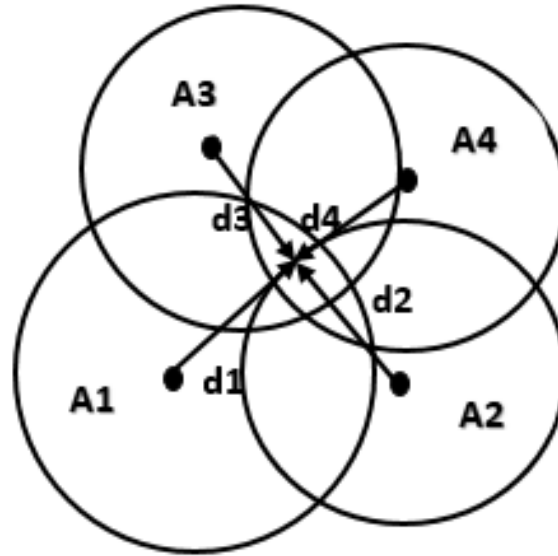


FIGURE 1.6 – Principe de la multilatération.

de la multilatération nécessite la résolution de l'équation suivante 1.8 :

$$(x - x_{A_i})^2 + (y - y_{A_i})^2 = d_i^2 \quad (1.8)$$

tel que (x_{A_i}, y_{A_i}) sont les coordonnées des ancres A_i quelque soit $i = 1..n$ (avec $n > 3$) tandis que (x, y) sont les coordonnées du nœud S à déterminer.

1.6 Domaines d'Application des RCSF pour l'IoT

Les nœuds de capteurs sont polyvalents pour une détection continue, la reconnaissance d'événements, leur identification, la localisation, et le contrôle des actionneurs locaux. Leur capacité de microdétection et de connexion sans fil ouvre la voie à de multiples nouveaux champs d'application. Nous organisons ces applications selon des secteurs comme le militaire, l'environnement, la santé, le foyer, et d'autres commerciales représentées sur la Figure 1.6 . Cette classification peut s'étendre pour inclure d'autres domaines tels que l'exploration spatiale, la chimie appliquée, ou les opérations de secours en cas de catastrophe [9–11].

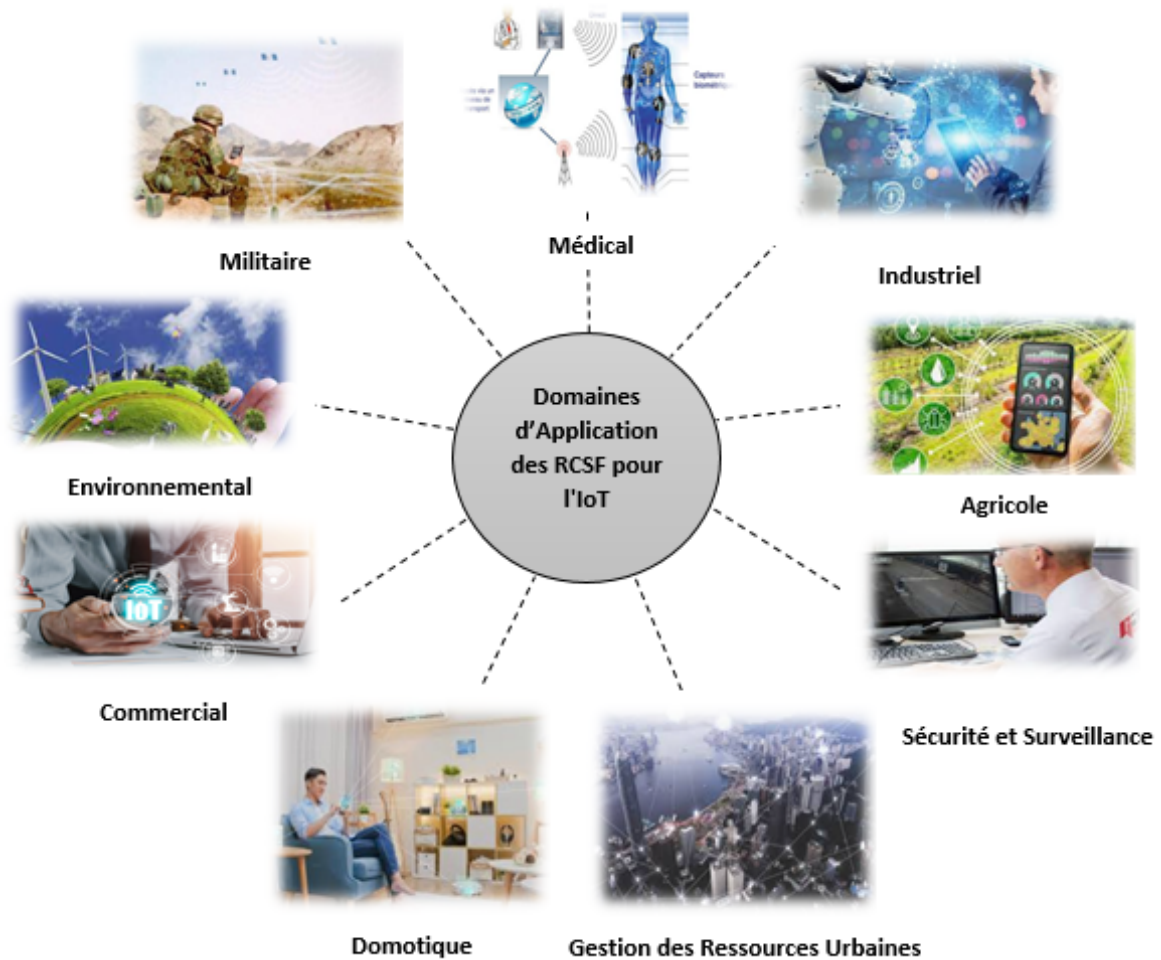


FIGURE 1.7 – Domaines d'Application des RCSF pour l'IoT.

1.6.1 Domaine Militaire

Les RCSF sont cruciaux dans les systèmes militaires pour le commandement, le contrôle, la communication, le renseignement, la surveillance et le ciblage (C4ISR). Leur déploiement rapide, autonomie et résilience face aux pannes en font une technologie prometteuse pour les besoins militaires. Leur structure à base de nœuds peu coûteux garantit que la perte de certains d'entre eux, contrairement aux capteurs traditionnels, n'impacte pas de manière significative les opérations militaires. Ainsi, ces réseaux offrent une approche plus avantageuse pour les zones de conflit. Leurs applications militaires incluent la surveillance des forces amies, de l'équipement et des munitions, la reconnaissance du champ de bataille, le ciblage, l'évaluation des dommages, ainsi que la détection des attaques nucléaires, biologiques et chimiques.

1.6.2 Domaine Environnemental

Certaines utilisations environnementales des réseaux de capteurs englobent la traque des déplacements des oiseaux, des petits animaux et des insectes, la surveillance des conditions environnementales impactant les cultures et le bétail, l'optimisation de l'irrigation, l'utilisation comme macro-instruments pour une surveillance étendue de la Terre et des explorations planétaires, la détection chimique ou biologique, l'application de l'agriculture de précision, la surveillance biologique et environnementale en milieux marins, terrestres et atmosphériques, la détection des incendies forestiers, les recherches météorologiques ou géophysiques, l'identification des zones inondées, la cartographie de la biodiversité environnementale complexe, ainsi que l'étude de la pollution.

1.6.3 Domaine Commercial

Certaines applications commerciales incluent diverses activités telles que la surveillance de la fatigue des matériaux, la création de claviers virtuels, la gestion des stocks, la surveillance de la qualité des produits, la conception d'espaces de bureau intelligents, le contrôle environnemental dans les immeubles de bureaux, la supervision et le guidage de robots dans des environnements de fabrication automatisés, la conception de jouets et de musées interactifs, l'automatisation des processus d'usine, la surveillance des zones sinistrées, l'intégration de structures intelligentes avec des capteurs intégrés, le diagnostic des machines, le transport, les instruments industriels, le contrôle local des actionneurs, la détection et la surveillance des vols de voitures, le suivi et la détection des véhicules, ainsi que l'instrumentation des chambres de traitement des semi-conducteurs, des machines rotatives, des souffleries et des chambres anéchoïques.

1.6.4 Domaine Médical

Certaines applications des réseaux de capteurs en santé comprennent des interfaces dédiées aux personnes handicapées, la surveillance intégrée des patients, le diagnostic médical, l'administration de médicaments en milieu hospitalier, le suivi des mouvements et des processus internes chez les insectes ou autres petits animaux, la télésurveillance des données physiologiques humaines, ainsi que le suivi et la surveillance des médecins

et des patients à l'intérieur des établissements hospitaliers.

1.6.5 Domaine Domotique

Avec l'évolution technologique, des capteurs et des actionneurs intelligents peuvent être intégrés dans des appareils courants tels que des aspirateurs, des fours à micro-ondes, des réfrigérateurs et des magnétoscopes. Ces capteurs, intégrés aux équipements domestiques, peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet ou satellite. Ils offrent aux utilisateurs finaux la possibilité de contrôler plus facilement ces appareils à la fois localement et à distance.

1.6.6 Domaine Industriel

Dans l'industrie, l'IoT permettra un suivi exhaustif des produits, depuis la chaîne de production jusqu'à la logistique et la distribution, en surveillant les conditions d'approvisionnement. Cette traçabilité complète simplifiera la lutte contre la contrefaçon, la fraude et les activités criminelles économiques à travers les frontières.

1.6.7 Domaine Agricole

Dans ce secteur, des réseaux de capteurs connectés à l'IoT peuvent être déployés pour surveiller l'environnement agricole. Cette approche favorisera une prise de décision plus éclairée en agriculture, en particulier pour optimiser l'irrigation, rationaliser l'utilisation des intrants et planifier les tâches agricoles. De plus, ces réseaux peuvent contribuer à la lutte contre la pollution de l'air, du sol et des eaux, ainsi qu'à l'amélioration générale de la qualité environnementale.

1.6.8 Domaine de la Sécurité et Surveillance

Se réfère à la protection des bâtiments d'entreprise, des centres commerciaux, des usines, des parkings et d'autres espaces publics tout en respectant la vie privée des utilisateurs. L'objectif est d'atteindre une sécurité optimale de manière efficace. Cela implique l'utilisation de divers capteurs, tels que les capteurs ambiants qui surveillent la présence de produits chimiques dangereux, ainsi que des dispositifs de surveillance du comportement humain afin de détecter toute activité suspecte.

1.6.9 Gestion des Ressources Urbaines

Les applications des réseaux de capteurs de l'IoT dans la gestion urbaine des ressources sont vastes. Ils s'intègrent dans la surveillance du remplissage des conteneurs à déchets, le contrôle de la qualité de l'eau et la détection des fuites dans les réseaux de distribution, ainsi que la gestion de la consommation d'eau. Ils permettent aussi la surveillance du trafic, des espaces verts comme les parcs et jardins urbains. Ces réseaux de capteurs, une fois incorporés à la gestion des ressources urbaines, facilitent la collecte en temps réel de données cruciales. Cela se traduit par des prises de décision plus informées, une optimisation de l'utilisation des ressources et une amélioration globale de la qualité de vie en ville.

1.7 Conclusion

Ce chapitre offre une exploration approfondie des RCSF et de leur pertinence dans l'IoT. En mettant en avant l'architecture détaillée des capteurs, les techniques de localisation, et la diversité des applications, il souligne l'innovation et l'adaptabilité de ces systèmes pour la collecte de données. La classification des domaines d'application, du militaire à la gestion urbaine des ressources, met en évidence leur impact potentiel étendu. La conclusion souligne ainsi l'importance croissante des RCSF dans notre société moderne, révélant à la fois leurs défis et leur capacité à façonner l'avenir de la connectivité et de la collecte de données dans divers secteurs. Le prochain chapitre abordera l'état de l'art sur les algorithmes de clustering dans les RCSF basés sur l'IoT.

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Introduction

Les RCSF sont devenus des composants essentiels de l'infrastructure technologique contemporaine, s'intégrant dans l'écosystème de l'IoT. Ces réseaux comprennent une multitude de capteurs déployés dans divers environnements, recueillant des données et interagissant pour répondre à différentes applications. Au cœur de cette interconnexion se trouve le clustering, un processus clé qui organise ces capteurs en groupes cohérents pour optimiser la gestion des données et la communication. Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les fondements du clustering dans les RCSF basés sur l'IoT, notamment les structures de cluster, les métriques pour l'élection des Cluster Heads (CH), le processus d'élection des CH, l'agrégation des données, ainsi que la communication intra-cluster et inter-cluster. Nous passerons ensuite en revue les différentes approches des algorithmes de clustering, les classant en approches centralisées et distribuées, et explorerons la méthodologie de recherche sous-jacente à leur évaluation et à leur développement. Enfin, nous classerons les algorithmes de clustering en fonction de leur approche et de leurs objectifs spécifiques dans les réseaux IoT, en mettant en lumière leurs spécificités et leurs implications. Cette analyse approfondie nous permettra de mieux appréhender le rôle essentiel du clustering dans l'optimisation de la gestion des données et de la communication au sein des RCSF basés sur l'IoT.

2.2 Fondements et Caractéristiques du Clustering dans les RCSF basé sur l'IoT

Les RCSF jouent un rôle central en tant qu'outils de collecte de données utilisés par les dispositifs de l'IoT. Ces réseaux, composés de petits capteurs alimentés par des batteries non rechargeables, sont répartis géographiquement et dédiés à la réalisation collaborative d'activités spécifiques. Ils sont déployés dans divers secteurs industriels tels que l'automatisation industrielle, la surveillance domestique, les applications de santé, les applications militaires, les systèmes de surveillance.

Ces nœuds de capteurs détiennent la capacité de capturer, traiter et transmettre sans fil des données liées à différents paramètres environnementaux, tels que les vibrations, la température, l'humidité, la qualité de l'eau ou de l'air, la composition du sol, la pression, le bruit, la lumière, ainsi que d'autres caractéristiques environnementales. Ces nœuds sont regroupés pour former un cluster, et un hub est désigné comme CH capable de communiquer avec un point central, appelé récepteur, passerelle ou BS, afin de conserver l'énergie. Ce dernier peut inclure des éléments tels que la taille, le poids, la position, la direction, la vitesse, etc [12].

Les caractéristiques du clustering dans les RCSF basés sur l'IoT englobent divers aspects. La classification de l'algorithme de clustering en centralisé ou distribué constitue une distinction significative. L'élection des CH, la communication intra-cluster et inter-cluster sont des composants essentiels pour la gestion et l'échange d'informations au sein des groupes de capteurs. Le niveau d'agrégation de données, la nature des clusters formés, ainsi que la variabilité et l'uniformité des tailles de cluster déterminent la structure et la dynamique des groupes constitués. Globalement, ces caractéristiques participent à façonner de manière efficiente le processus de clustering dans les RCSF de l'IoT [13].

2.2.1 Principes et Concepts du Clustering

Le concept de clustering explore une variété d'aspects, notamment les structures de cluster, les métriques pour la désignation des CH, le déroulement du processus d'élection des CH, l'agrégation des données, la communication au sein et entre les clusters, le flux procédural du processus de clustering, ainsi que les indicateurs de performance

des algorithmes de clustering. Cette analyse approfondie établira les fondations nécessaires pour une compréhension approfondie des mécanismes et des défis inhérents au clustering dans le contexte de l'analyse de données.

2.2.1.1 Structure de Cluster

Le clustering est une méthode visant à diviser le réseau en groupes distincts, appelés clusters. Chaque cluster est dirigé par un nœud spécifique désigné comme CH. De plus, des Cluster Members (CM) sont identifiés au sein de chaque groupe Cluster Gateway (CG) [14] représenté sur la Figure 2.1.

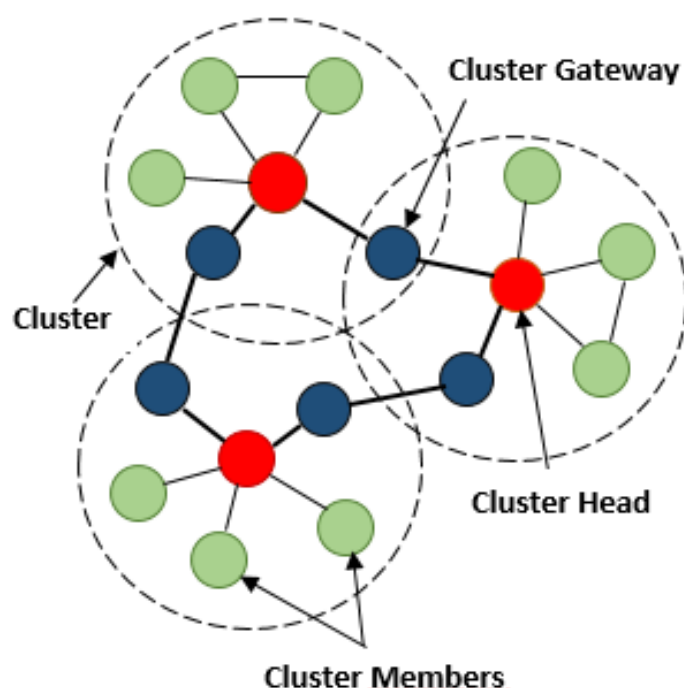


FIGURE 2.1 – Exemple de structure d'un cluster.

1. **Cluster Head (CH)** : Le CH assume le rôle de coordination et de gestion du groupe, en compilant les données reçues. De plus, le CH est responsable d'autres tâches, notamment le transfert d'informations entre les nœuds à l'intérieur du groupe ainsi qu'entre les nœuds à l'extérieur du groupe.
2. **Cluster Member (CM)** : Les CM représentent des nœuds réguliers sous la supervision du CH. Leur responsabilité principale consiste à transmettre régulièrement des informations et des données à leur chef de cluster. Il est important de noter que les membres du cluster ne sont pas en mesure d'établir une communication directe avec d'autres CM ou CH appartenant à d'autres clusters.

3. **Cluster Gateway (CG)** : Le CG est un nœud au sein d'un réseau de clusters qui joue le rôle d'une passerelle, facilitant la communication entre les divers clusters et assurant le transfert de données entre eux.

2.2.1.2 Métriques pour l'élection des CH

Plusieurs métriques ont été suggérées dans les écrits pour choisir l'ensemble des CH. Nous suggérons de catégoriser les algorithmes de clustering en cinq classes en fonction du type de mesures utilisées lors de la sélection des CH tel qu'illustré dans la Figure 2.2 Ces cinq classes sont les suivantes [15, 16] :

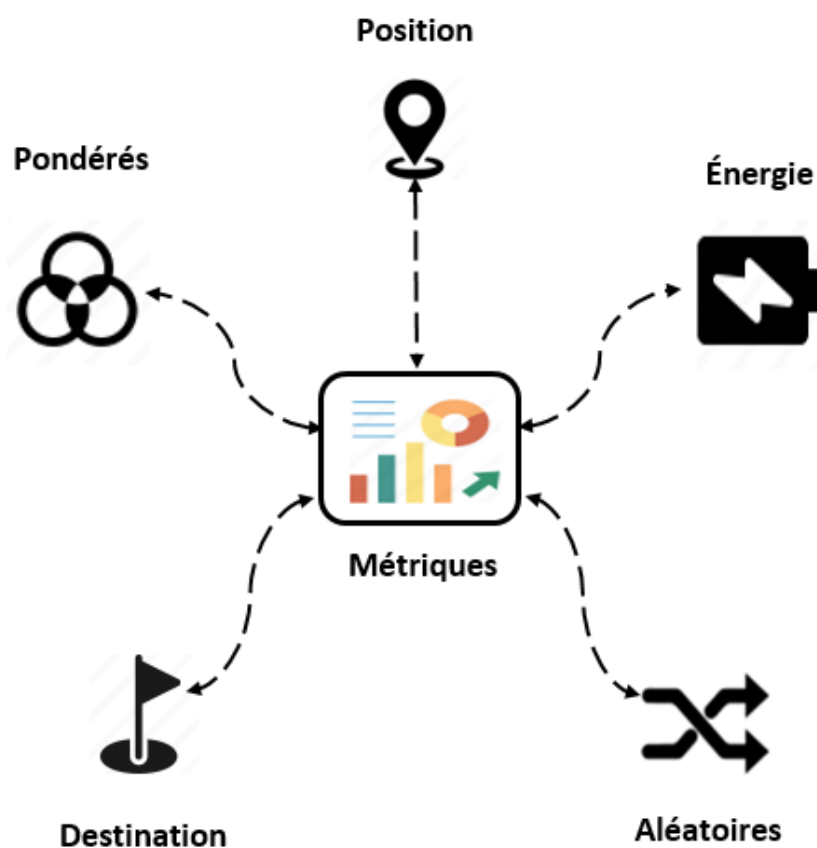


FIGURE 2.2 – Métriques utilisés dans la phase d'élection des CH.

1. **Métriques aléatoires** : Les algorithmes probabilistes jouent un rôle significatif dans l'optimisation de la durée de vie du réseau. Dans ces méthodes, le choix du CH se fait de manière aléatoire en se basant sur des facteurs de probabilité.
2. **Métriques de position** : Cette catégorie d'algorithmes suppose que chaque nœud est capable de déterminer sa position géographique, par exemple, en utilisant un système GPS.

3. **Métriques d'énergie** : Réunit l'ensemble des algorithmes qui se basent sur la quantité d'énergie restante dans les batteries des nœuds en tant que critère de choix pour la sélection des CH.
4. **Métriques pondérées** : Cette catégorie désigne les algorithmes pondérés qui intègrent diverses métriques provenant de différents types.
5. **Métriques de destination** : Le fonctionnement de ces algorithmes est lié à la position de la destination vers laquelle les informations sont transmises.

2.2.1.3 Processus d'élection des CH

Le nœud CH englutit davantage d'énergie que les autres nœuds du réseau. En assurant la coordination des nœuds membres de son cluster et l'agrégation de leurs données, il dissipe une quantité d'énergie plus élevée, perturbant l'équilibre énergétique du réseau. Pour résoudre cette problématique, une rotation du rôle de CH est instaurée au sein du cluster ou même à l'échelle du réseau entier. Cette rotation s'opère de manière périodique ou en fonction de la consommation énergétique du nœud CH [13].

2.2.1.4 Agrégation des Données

L'agrégation de données consiste à fusionner des données provenant de différentes sources en utilisant des méthodes telles que la suppression, la détermination des valeurs minimales, maximales, ou encore des moyennes. Cette opération peut s'effectuer à l'échelle de chaque nœud du réseau ou exclusivement au niveau du CH, selon la nature de l'application. Cette technique a été adoptée pour réduire la quantité de données échangées entre les nœuds, constituant un procédé essentiel pour résoudre le problème de redondance des données à transmettre, ce qui contribue à optimiser la consommation d'énergie lors de la transmission des données [17].

2.2.1.5 Communications Inter-Cluster et Intra-Cluster

Les communications inter-cluster et intra-cluster font référence aux échanges d'informations entre les clusters (inter-cluster) et à l'intérieur des clusters (intra-cluster) lors du processus de clustering [13].

1. **Communication Intra-Cluster** : La communication entre les nœuds membres d'un CH et les autres peut se faire de deux manières : en une seule transmis-

sion directe ou en plusieurs étapes. La transmission directe envoie les données directement au CH, nécessitant une puissance de transmission élevée des nœuds membres pour une réception efficace par le CH. Cependant, cette méthode est énergivore pour de grandes distances entre les nœuds et le CH. Pour économiser l'énergie, une transmission en plusieurs étapes sur de courtes distances est préférée : chaque CM envoie ses données au nœud membre le plus proche, jusqu'à ce que les données parviennent au CH. Ce mode de communication est fréquemment utilisé pour éviter les collisions et économiser l'énergie.

2. **Communication Inter-Cluster** : Les CH échangent des données avec la BS soit en une seule étape directe, soit en plusieurs étapes à travers des nœuds souvent désignés sous le nom de « nœuds intermédiaires ». Ces nœuds peuvent être des CH ou des membres classiques d'un cluster. L'adoption de la communication en plusieurs étapes permet de diminuer la consommation d'énergie et d'accroître la capacité d'expansion du réseau.

2.2.1.6 Flux procédural du Processus de Clustering

Le processus de clustering se compose de deux parties principales : la formation du groupe et l'élection. Il se déroule en cinq étapes distinctes [18] : découverte de voisinage, élection des CH, annonce, affiliation et maintenance comme le montre dans la Figure 2.3 :

1. **Découverte de voisinage** : Les nœuds du réseau surveillent et évaluent leur environnement local, établissant des échanges périodiques de messages avec leurs voisins. Ces messages comprennent des informations cruciales pour chaque nœud, telles que la position, le niveau d'énergie et la destination. Ces informations sont utilisées par les nœuds tout au long du processus de clustering, avant de passer à l'étape des élections.
2. **Élection des CH** : Après la découverte de voisinage, les nœuds analysent ces informations pour sélectionner le nœud approprié en tant que CH. Le choix du CH repose sur le critère spécifique sélectionné. Si le nœud est qualifié pour devenir CH, il mettra à jour son statut en tant que CH et passera à l'étape d'annonce.
3. **Annnonce** : Chaque CH informe ses voisins de la même portée de son élection et qu'il reprendra la direction d'un cluster. Une fois qu'un CH a choisi les membres

de son groupe, il passe à l'étape de maintenance.

4. **Affiliation** : Le nœud reçoit un message d'annonce du CH et le compare avec le CH qui a été préalablement choisi. En cas de correspondance avec le CH élu localement, le nœud envoie un message d'inscription, met à jour son statut de CM. Dans le cas contraire, le nœud ignore le message et attend un autre message.
5. **Maintenance** : Durant l'étape de maintenance au sein d'un RCSF, le comportement des nœuds est conditionné par leur rôle, qu'ils assument en tant que CH ou CM.

- En tant que CH, le nœud surveille de manière régulière les nœuds CM en échangeant des messages pour enregistrer leur présence. Si un nœud CM se déplace en dehors de la portée du cluster, le CH le détecte et le retire de sa liste de membres.
- En tant que CM, le nœud effectue régulièrement des vérifications de la connectivité avec son CH en utilisant des messages. En cas de perte de la connexion, le nœud CM modifie son état en unclustered (UN) et tente de rejoindre un autre cluster.

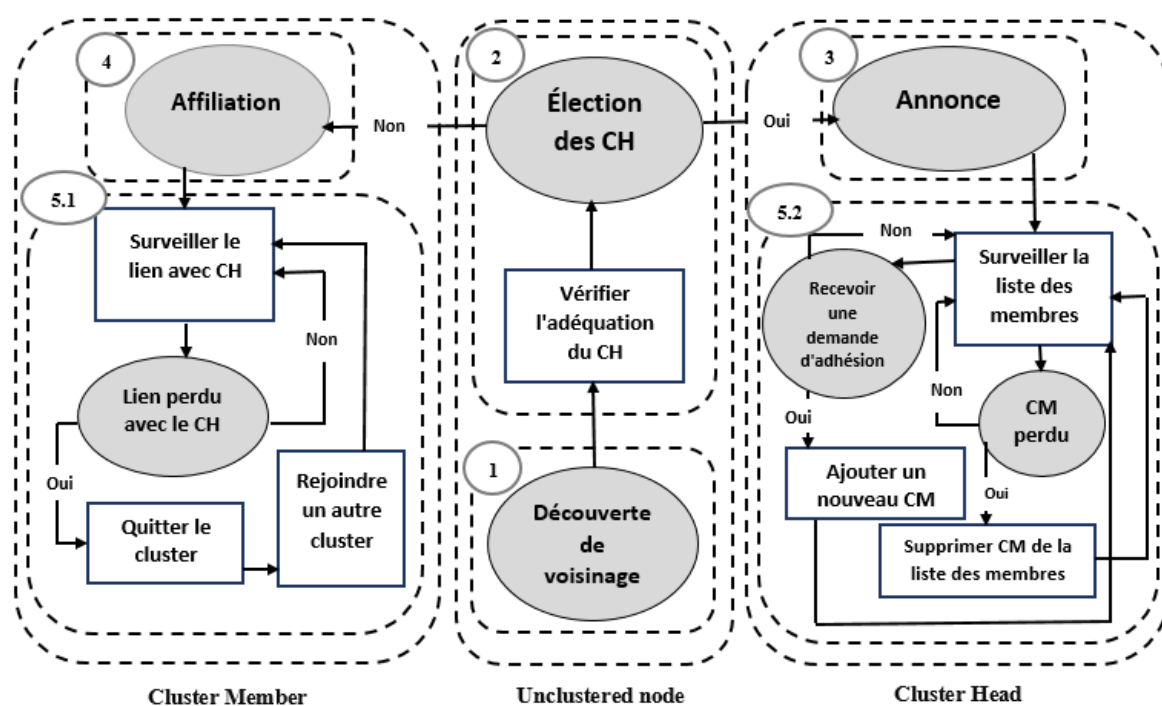


FIGURE 2.3 – Flux procédural de clustering.

2.2.1.7 Mesures de performance pour les algorithmes de clustering

En raison de la variété et de la diversité des algorithmes de clustering proposés, il peut être complexe de déterminer les métriques d'évaluation de performance appropriées. En référence aux travaux de [16], nous avons identifié les catégories de métriques suivantes [16] :

1. **Surcharge du réseau** : Nombre de messages associés au processus de clustering qui est généré pendant la durée d'exploitation du réseau.
2. **Complexité en termes de messages** : La complexité en messages liée à un changement de topologie se réfère au nombre de messages échangés entre les nœuds afin de réaliser une réorganisation valide des clusters après une modification de la topologie du réseau.
3. **Complexité en termes de temps** : La complexité temporelle d'un changement de topologie se mesure par la durée nécessaire à la réalisation d'une réorganisation valide des clusters après une modification dans la topologie du réseau.
4. **Stabilité de la structure des clusters** :
 - **Durée moyenne de vie d'un CH** : La durée moyenne pendant laquelle un nœud assume la fonction de CH.
 - **Durée moyenne de vie d'un membre** : La durée moyenne pendant laquelle un nœud demeure affilié à son CH.
 - **Nombre de changements de CH** : Le nombre d'occasions où le statut d'un CH est modifié.
 - **Nombre de ré-affiliation** : Le compteur de ré-affiliation augmente lorsqu'un nœud est détaché de son CH actuel pour se ré-affilier en tant que membre à un autre CH à l'intérieur de l'ensemble dominant en cours.
 - **Durée de Vie du Réseau** : la période pendant laquelle un réseau fonctionne efficacement avant de nécessiter une maintenance majeure ou un remplacement.
 - **Efficacité énergétique** : la capacité à utiliser moins d'énergie pour fournir le même service ou résultat, réduisant ainsi la consommation d'énergie et les coûts associés.

- **Taux de réussite de livraison de paquets (PDR)** : le pourcentage de paquets de données envoyés qui sont correctement reçus par le destinataire dans un réseau de communication.

2.3 Approches des algorithmes de Clustering

Les approches des algorithmes de clustering peuvent être classées en deux catégories principales : les approches centralisées et les approches distribuées [13].

2.3.1 Approche centralisée

L'exécution de l'algorithme se fait au niveau du nœud disposant d'une vision globale du réseau, souvent situé à la BS. Ce type d'algorithme est rarement employé en raison de la charge supplémentaire engendrée par les transmissions nécessaires pour maintenir une vue globale du réseau. De plus, la dynamique changeante de la topologie contribue à rendre cette vue très instable.

2.3.2 Approche distribuée

L'algorithme fonctionne de manière collaborative à travers chaque nœud du réseau, où la coordination des tâches de contrôle se réalise par l'échange de messages dédiés. Ce type d'algorithme réduit la nécessité de communication pour maintenir une vue globale du réseau, car chaque nœud prend des décisions indépendantes et communique ses choix par l'envoi de messages. Cependant, l'efficacité de ces algorithmes est tributaire de la quantité et de la taille de ces messages de synchronisation.

2.4 Méthodologie de recherche

Étant donné la pléthore d'algorithmes de clustering proposés pour les réseaux IoT, nous procéderons à une analyse approfondie de certains d'entre eux. La sélection des algorithmes s'est basée sur une revue de la littérature existante sur le clustering, ainsi que sur notre propre recherche axée sur les techniques de clustering spécifiquement conçues pour les réseaux IoT. Nous avons également pris en compte les nouveaux algorithmes de clustering qui n'ont pas été inclus dans les études précédentes, en nous limitant à

la consultation d'articles académiques rédigés en anglais et publiés sur ScienceDirect, SpringerLink et IEEE Xplore. Pour décrire chaque algorithme, nous avons examiné les résumés des articles correspondants. Notre approche méthodologique a consisté à utiliser les termes de recherche "Algorithmes de Clustering pour les Réseaux IoT" ou "Clustering". Par ailleurs, nous avons utilisé les critères suivants pour comparer les algorithmes étudiés : densité, stabilité, temps de réponse, coûts indirects et interférences.

2.5 Classification des Algorithmes de Clustering pour les Réseaux IoT

En se basant sur les métriques d'élection des CH discutées précédemment, nous aborderons désormais en détail les algorithmes de clustering pour les réseaux IoT, en nous appuyant sur la classification présentée dans la Figure 2.4.

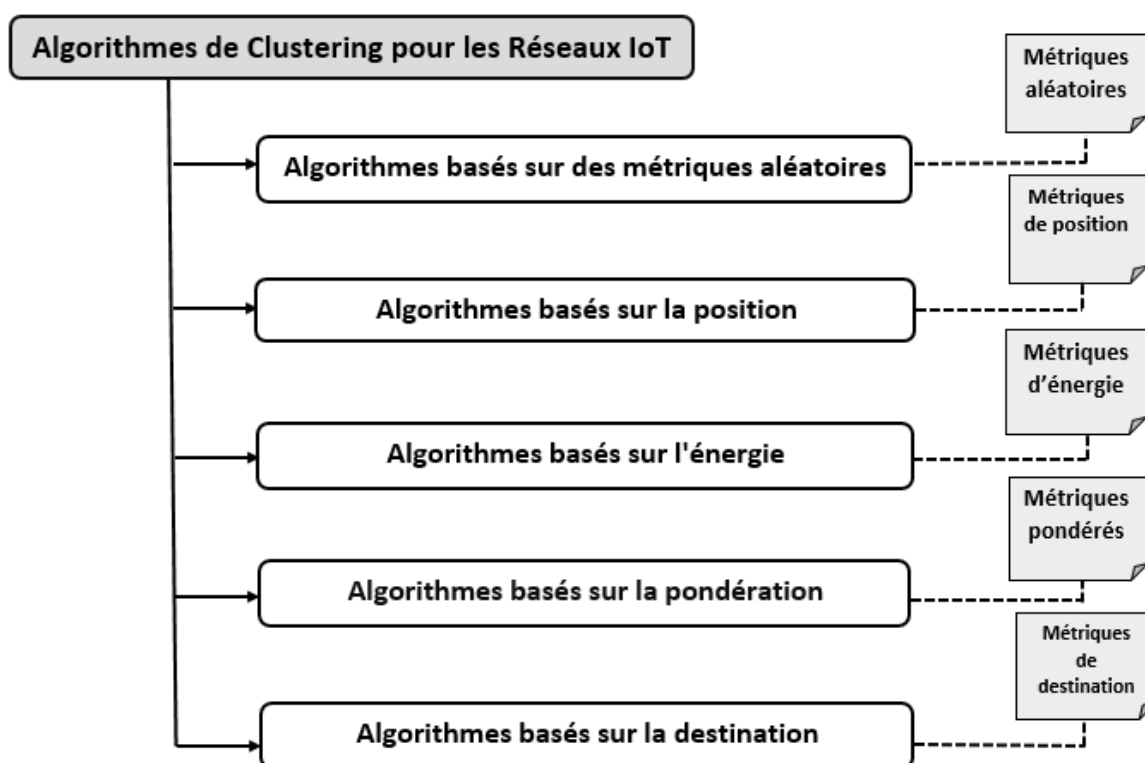


FIGURE 2.4 – Taxonomie des algorithmes de clustering pour les RCSF pour l'IoT.

2.5.1 Algorithmes de clustering basés sur des métriques aléatoires

Les algorithmes basés sur des métriques aléatoires jouent un rôle important dans l'optimisation de la durée de vie du réseau. Dans ces approches, le choix du CH se fait de manière aléatoire en se basant sur des facteurs de probabilité. Cette caractéristique aléatoire peut conduire à des résultats variés à chaque exécution, ce qui peut complexifier leur interprétation et leur utilisation. Plusieurs algorithmes de ce type seront abordés dans cette section.

2.5.1.1 LEACH

Le protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est un algorithme de clustering pour les RCSF, visant à prolonger la durée de vie du réseau en réduisant la consommation d'énergie des nœuds. Il organise les clusters de manière auto-organisée, attribuant à chaque cluster un CH. Toutefois, certains nœuds non regroupés consomment plus d'énergie. LEACH choisit aléatoirement les CH pour équilibrer la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau. Chaque cycle comprend une phase de configuration pour former les groupes et une phase d'état stable pour transférer les données. Toutefois, son caractère distribué et aléatoire peut entraîner un déséquilibre de charge entre les clusters et ainsi dégrader les performances globales du réseau [19].

2.5.1.2 k-means

L'algorithme k-means est un outil efficace et largement utilisé en exploration de données, cherchant à minimiser les distances entre les points et leurs centroïdes. La détermination du nombre optimal de clusters est essentielle dans ce processus. Les centroïdes de cluster sont initialement choisis aléatoirement, puis les points de données proches de chaque centroïde sont regroupés dans un cluster. Les nouveaux centroïdes sont ensuite calculés pour chaque cluster formé. Cette itération se poursuit jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint, tel que la convergence des centroïdes ou un nombre maximal d'itérations. Cependant, la sensibilité à l'initialisation aléatoire des centroïdes peut entraîner des résultats variables, affectant la qualité de la segmentation des données [20].

2.5.1.3 URDFL

L'algorithme URDFL (Uniform Randomly Distributed Fuzzy Logic) pour le clustering dans les RCSF utilise la puissance de la batterie, la centralité des nœuds et la distance par rapport à la BS pour sélectionner les CH, afin d'améliorer la durée de vie du réseau et de réduire la consommation d'énergie. La puissance de la batterie est cruciale dans le choix du CH, qui collecte ensuite les données des nœuds pour les transmettre à la BS. La centralité des nœuds affecte également la sélection du CH, favorisant les nœuds moins centraux. Réduire la distance entre la BS et le CH est essentiel pour économiser de l'énergie. L'intégration de ces critères vise à améliorer l'efficacité énergétique et la durée de vie des RCSF, en utilisant plus efficacement les ressources disponibles. Cependant, cet algorithme a du mal à gérer efficacement les environnements dynamiques et complexes [21].

2.5.1.4 RRCEH

Le protocole RRCEH (Random Relay Coordination and Energy Harvesting) est crucial dans les EHWSN (Energy Harvesting Wireless Sensor Networks), offrant une solution optimisée pour les clusters fixes à faible coût. En utilisant une approche de migration aléatoire des relais, RRCEH améliore l'efficacité de la communication inter-cluster par rapport aux protocoles traditionnels. Il assigne des vecteurs de relais aléatoires à chaque région en anneau du réseau, optimisant ainsi la coordination du chargement des données du CH. Ce protocole réduit la demande énergétique pour la collecte d'énergie et les coûts du réseau en optimisant l'impact de la communication inter-cluster sur la capacité de récupération d'énergie nécessaire au CH. Cependant, la migration aléatoire des relais peut entraîner des variations de qualité de communication inter-cluster et une inefficacité énergétique [22].

Tableau 2.1 présente une comparaison des algorithmes en fonction de plusieurs mesures clés.

2.5.2 Algorithmes de clustering basés sur la position

Les algorithmes de clustering basés sur la position regroupent les données selon leur position géographique, en utilisant les informations de localisation des clusters déjà formés. Ils supposent que toutes les données sont géolocalisables, souvent via des

Algorithme	Densité	Stabilité	Latence	Surcharge	Overlapping	Complexité
LEACH	Faible	Moyenne	Élevée	Faible	Faible	Moyenne
k-means	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne
URDFL	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Élevée
RRCEH	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne

TABLE 2.1 – Comparaison des algorithmes de clustering basés sur des métriques aléatoires.

dispositifs comme le GPS. Plusieurs algorithmes de ce type existent, nous en aborderons certains dans ce titre.

2.5.2.1 LEACH-C

L'algorithme LEACH-C (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy-Centralized) divise le réseau en CH et CM, fonctionnant par cycles de stabilité et phases de configuration. Durant la formation des clusters, aucun coût supplémentaire n'est imposé aux nœuds capteurs. La sélection du CH se base sur la position des nœuds, leur distance à la BS, la densité du réseau et l'énergie restante. Chaque nœud transmet ses données à la BS, incluant sa position et son niveau d'énergie. Seuls les nœuds dépassant l'énergie moyenne calculée par la BS peuvent participer à la sélection du CH, garantissant une répartition équitable de l'énergie. Cependant, la dépendance à une infrastructure centralisée peut limiter la scalabilité de l'algorithme, le rendant inefficace dans les déploiements à grande échelle ou dans des environnements avec une connectivité limitée au nœud central [23].

2.5.2.2 CHP

Un CHP (Cluster Head Positioning) pour les RCSF est conçu pour améliorer l'efficacité énergétique et la durée de vie du réseau tout en minimisant les interférences. Les CHP diffusent des demandes de localisation à tous les réseaux privés du groupe pour leurs emplacements. Chaque canal calcule son nouvel emplacement optimal pour réduire la perte de signal entre les réseaux de service et leurs stations. L'échange de messages de contrôle entre les stations et les réseaux privés est utilisé, avec une charge utile minimale pour réduire les frais. L'algorithme optimise l'emplacement des CH dans un cluster et la formation de clusters dans une topologie hélicoïdale, assurant la communication entre les CH jusqu'à la BS. L'évaluation prend en compte la consommation

d'énergie et la durée de vie du réseau, mais la sensibilité de l'algorithme CHP à la taille et à la densité du réseau peut augmenter la complexité et les coûts de communication [24].

2.5.2.3 LE-KCR

L'algorithme de routage par clustering LE-KCR (Low-Energy K-Coverage Routing), sensibilisé à l'énergie, applique la technique K-means en tenant compte à la fois de la localisation existante et de l'énergie résiduelle de chaque nœud. Dans LE-KCR, l'emplacement et l'énergie résiduelle du CH candidat, ainsi que la distance entre celui-ci et le nœud récepteur, sont pris en considération lors de la sélection du CH. L'objectif de l'algorithme LE-KCR est de maximiser la durée de vie du réseau en améliorant la couverture des capteurs et en réduisant la consommation d'énergie lors du transfert de données. Conçu pour une couverture réseau économe en énergie, LE-KCR peut être inefficace face à des changements tels que les mouvements de nœuds ou les perturbations environnementales [25].

2.5.2.4 PSO

Les économies d'énergie sont cruciales pour prolonger la durée de vie des RCSF, avec une agrégation uniforme du réseau et une sélection judicieuse des CH étant essentielles. Une approche suggérée utilise l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) pour améliorer le processus de sélection du centre initial dans l'algorithme K-means, utilisé pour le clustering des réseaux, afin d'éviter les optimums locaux. Un algorithme K-means amélioré est ensuite utilisé pour regrouper les nœuds capteurs, prenant en compte à la fois l'énergie résiduelle et la localisation des nœuds. Une fonction de fitness ajuste dynamiquement ces facteurs pour sélectionner les CH appropriés. Cependant, la dépendance de PSO à la configuration des paramètres et à la complexité des modèles de sélection des centres initiaux peut influencer la convergence et l'efficacité de la sélection des CH dans les RCSF [26].

Tableau 2.2 propose une comparaison des algorithmes en se basant sur des mesures clés.

Algorithme	Densité	Stabilité	Latence	Surcharge	Overlapping	Complexité
LEACH-C	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne
CHP	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Élevé
LE-KCR	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne
PSO	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Élevé

TABLE 2.2 – Comparaison des algorithmes de clustering basés sur la position.

2.5.3 Algorithmes de clustering basés sur l'énergie

Les méthodes de clustering utilisant des algorithmes basés sur l'énergie sont essentielles et très répandues dans l'optimisation de la durée de vie des RCSF. Ces algorithmes, qui exploitent l'énergie résiduelle ou moyenne, jouent un rôle crucial dans ce domaine. Dans les sections suivantes, nous passerons en revue certains de ces algorithmes.

2.5.3.1 CEC

L'algorithme CEC (Cross-layer Energy based Clustering) vise à prolonger la durée de vie des RCSF en réduisant la redondance et la congestion des données. Adapté aux environnements hétérogènes, il classe les nœuds en différents niveaux en fonction de leur énergie et détermine la distance optimale pour le CH afin de minimiser la consommation d'énergie. En segmentant le réseau en hexagones et en utilisant une synchronisation de l'énergie et du temps d'attente, il permet aux Capteurs Mobiles de prolonger la durée de vie du réseau. Cependant, la collecte de données par les CH peut entraîner des congestions et des retards dans les transmissions, affectant ainsi les performances globales du réseau [27].

2.5.3.2 TEEECH

L'algorithme TEEECH (Threshold-based Energy Efficient Clustering and Hierarchical) sélectionne les CH en fonction d'un seuil préétabli, puis les classe par ordre décroissant de seuil pour déterminer le nombre final de CH, équivalent au nombre de clusters optimaux. Il favorise la communication directe avec la BS pour améliorer la formation des clusters. TEEECH vise principalement à réduire la consommation énergétique des réseaux en utilisant l'agrégation de données pour minimiser les transmissions vers la BS, ce qui réduit la distance de transmission dans les réseaux privés. Le

processus de sélection des CH prend en compte la puissance et l'énergie résiduelle des nœuds alimentés par batterie. Cependant, des variations inattendues de l'énergie, des mouvements de nœuds et des interférences électromagnétiques peuvent compromettre l'efficacité énergétique des seuils choisis sur le long terme [28].

2.5.3.3 FPSTERP

Le protocole FPSTERP (FPA-based stable threshold-sensitive energy-efficient cluster-based routing protocol) utilise l'algorithme de FPA (Flower pollination algorithm) pour optimiser la sélection des CH. Il opère en cycles comprenant des phases de mise en place et de régime permanent. Pendant la configuration, la BS choisit les CH parmi les nœuds de capteurs actifs dont l'énergie dépasse un seuil prédéfini, établi comme l'intensité énergétique moyenne de tous les capteurs actifs. La BS communique brièvement pour éveiller les capteurs et collecter des données. Ensuite, le FPA minimise une fonction de fitness basée sur l'énergie restante des nœuds, privilégiant les nœuds à énergie plus élevée en tant que CH, exploitant efficacement les déséquilibres énergétiques entre les types de nœuds pour améliorer la stabilité du système. Cependant, la sélection des CH basée sur un seuil d'énergie peut manquer d'efficacité dans des environnements caractérisés par des variations importantes des niveaux d'énergie [29].

2.5.3.4 EEUCB

L'approche EEUCB (Energy-Efficient Unequal Clustering Scheme based on Balanced Energy Method) vise à prolonger la durée de vie du réseau en minimisant la consommation d'énergie. Elle optimise les clusters en réduisant la taille des nœuds CH proches de la BS pour éviter les décharges prématurées. Le protocole intègre un mécanisme de veille-sommeil basé sur la distance entre les nœuds capteurs et le CH, ainsi que leur niveau d'énergie. Pour réduire la charge des CH, un CH secondaire (2CH) est introduit, où le CH principal assure la transmission entre les groupes et le 2CH gère la réception et l'assemblage des données. Une stratégie de rotation de clustering basée sur les seuils d'énergie moyen, de distance moyen et les performances de superposition est également proposée pour équilibrer la consommation d'énergie. Cependant, malgré son objectif d'équilibrage énergétique entre les clusters, EEUCB peut être limité lorsque certains nœuds présentent des niveaux d'énergie initiaux très disparates [30].

Le Tableau 2.3 offre une comparaison entre les algorithmes en se basant sur plusieurs mesures clés.

Algorithme	Densité	Stabilité	Latence	Surcharge	Overlapping	Complexité
CEC	Moyenne	Élevée	Faible	Élevée	Faible	Moyenne
TEEECH	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne
FPSTERP	Moyenne	Élevée	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne
EEUCB	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne

TABLE 2.3 – Comparaison des algorithmes de clustering basés sur l'énergie.

2.5.4 Algorithmes de clustering basés sur la pondération

Cette catégorie désigne les algorithmes pondérés, qui utilisent une fonction combinant plusieurs métriques pour la sélection des CH. Contrairement à ceux qui se basent sur une seule métrique, ces algorithmes pondérés intègrent plusieurs critères dans leur processus de sélection. Nous aborderons certains de ces algorithmes dans cette section.

2.5.4.1 EE-WCA

Dans l'algorithme EE-WCA (Energy Efficient Weighted Clustering Algorithm) pour la formation de clusters. EE-WCA, axé sur l'efficacité énergétique, vise à améliorer la qualité de service en sélectionnant les CH adaptés et en ajustant leur choix pour une répartition optimale des ressources. Les performances des nœuds sont évaluées selon cinq critères de qualité de service, notamment la mémoire tampon, la mobilité, le niveau de batterie, la connectivité et le rapport signal/bruit (SNR), qui influent sur le stockage, la consommation d'énergie et la qualité de la communication. Cependant, l'algorithme EE-WCA est confronté à des défis en raison de l'évaluation de cinq critères, ce qui augmente le temps de calcul et la consommation d'énergie pour le clustering et la sélection des CH [31].

En se basant sur ces paramètres, les poids (W) sont déterminés selon l'équation 2.1, ce qui permet de sélectionner le CH optimal.

$$W = \left| \frac{(F_A - F_{\min})}{(F_{\max} - F_{\min})} \right| - \left| \frac{(d_A - d_{\min})}{(d_{\max} - d_{\min})} \right| - \left| \frac{\Delta_{e_A} - \Delta_{e_{\min}}}{\Delta_{e_{\max}} - \Delta_{e_{\min}}} \right| + \left| \frac{(D_A - D_{\min})}{(D_{\max} - D_{\min})} \right| + \left| \frac{(SNR_A - SNR_{\min})}{(SNR_{\max} - SNR_{\min})} \right| \quad (2.1)$$

tel que :

- F : indique la longueur du tampon.
- d : décrit le déplacement du nœud.
- e : montre l'énergie du nœud du réseau.
- D : montre le degré d'un nœud.
- SNR : affiche le rapport signal/bruit.

2.5.4.2 WCHSA

L'algorithme WCHSA (Weighted Cluster Head Selection Algorithm) optimise la transmission des paquets pour économiser l'énergie et prolonger la durée de vie du réseau en actualisant régulièrement les CH de chaque cluster. Initialement, l'algorithme de clustering K-medoid divise le réseau en clusters. Ensuite, une méthode pondérée sélectionne le CH en considérant trois poids pour chaque nœud de capteur : énergie, distance au centre du cluster et distance au nœud récepteur. Chaque nœud se voit attribuer un poids constant basé sur son niveau d'énergie et ses distances. Cependant, la performance de WCHSA peut être affectée par les valeurs initiales et la topologie du réseau, rendant sa mise en œuvre complexe et moins fiable dans des environnements dynamiques ou hétérogènes [32].

2.5.4.3 K-WCH

L'algorithme K-WCH (K-Weighted Cluster Head Selection) a été développé pour améliorer la sélection des nœuds CH dans les RCSF en prenant en compte diverses mesures de performance telles que les temps d'exécution, les distances, l'énergie restante et la connectivité des nœuds voisins. Son objectif principal est d'accroître la durée de vie des nœuds du réseau en réduisant la charge de calcul et en minimisant le nombre de nœuds inactifs. En utilisant ces paramètres de réseau comme indicateurs, l'algorithme K-WCH calcule un facteur de pondération et sélectionne un nœud en tant que CH en se basant sur des critères de poids et d'énergie résiduelle élevés. La performance de K-WCH est tributaire de la qualité de la partition des données réalisée par l'algorithme K-means. Ainsi, des résultats sous-optimaux peuvent être obtenus si le nombre de clusters initial, k , est mal choisi ou si les données présentent une distribution complexe ou non linéaire [33].

2.5.4.4 EWCP

Le clustering des nœuds de capteurs est une stratégie visant à prolonger la durée de vie et à améliorer la fiabilité des RCSF en réduisant la consommation d'énergie. Le protocole EWCP (Energy-efficient Weighted multi-level Clustering Protocol) est présenté à cet effet. Dans ce cadre, les CH sont sélectionnés en fonction d'une pondération attribuée à chaque nœud de capteur, prenant en compte des paramètres tels que la densité, l'énergie résiduelle et la distance, dans le but d'optimiser la durabilité et l'efficacité du réseau. De plus, les CM sont choisis en fonction de leur proximité avec les stations définies. Cependant, le protocole EWCP peut éprouver des difficultés de scalabilité avec l'augmentation du nombre de nœuds, ce qui complexifie les opérations de clustering et de sélection de CM, entraînant une hausse des temps de calcul et de la consommation d'énergie [34].

Le Tableau 2.4 évalue les algorithmes en fonction de diverses mesures clés.

Algorithme	Densité	Stabilité	Latence	Surcharge	Overlapping	Complexité
EE-WCA	Moyenne	Faible	Élevée	Élevée	Faible	Élevée
WCHSA	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Élevée
K-WCH	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne
EWCP	Moyenne	Faible	Moyenne	Élevée	Faible	Élevée

TABLE 2.4 – Comparaison des algorithmes de clustering basés sur la pondération.

2.5.5 Algorithmes de clustering basés sur la destination

Les algorithmes de clustering basés sur la destination intègrent des métriques telles que l'emplacement géographique actuel et la direction de la destination pour réaliser le processus de clustering. L'efficacité de ces algorithmes dépend de la relation spatiale entre la destination et les données transmises. Plusieurs algorithmes de ce type seront examinés dans cette section.

2.5.5.1 LBRP

Le protocole LBRP (Location-Based Routing Protocol) utilise les données de localisation et un schéma de routage basé sur un transfert glouton pour acheminer les paquets de données d'un nœud source à un nœud destination. Certains nœuds enregistrent les positions de tous les nœuds du réseau, appelés service de localisation des

nœuds. Lorsqu'un nœud souhaite envoyer un paquet de données, il active d'abord le module de service de localisation pour obtenir les positions du nœud de destination et du prochain saut vers la destination à partir du Service de localisation des nœuds. Ensuite, le nœud transmet les informations au prochain saut jusqu'à ce que le paquet atteigne sa destination. Le schéma de routage "Greedy Forwarding" est utilisé pour sélectionner le nœud voisin le plus proche de la destination pour transmettre les paquets de données. Bien que LBRP améliore le débit du réseau, il peut entraîner des surcharges de bande passante [35].

2.5.5.2 TACM

La TACM (Tracking-Anchor-based Clustering Method) a été développée. TACM comprend quatre phases : la sélection de l'ancre de suivi, l'activation des nœuds, la formation de cluster et la planification de l'état des CM. Initialement, l'algorithme RFCM (Rough-Fuzzy C Means) est utilisé pour localiser l'ancre de suivi et déterminer l'affiliation des nœuds environnants. Ensuite, une table d'adhésion est construite et des règles d'activation des nœuds sont établies. Les nœuds activés deviennent alors l'ensemble des nœuds de suivi, et le CH est sélectionné via un mécanisme de diffusion différée. Enfin, en utilisant une programmation linéaire 0-1, les CM sont planifiés dans des états appropriés pour réduire les transmissions redondantes. L'algorithme RFCM peut compliquer les opérations dans les réseaux denses ou vastes, rallongeant les temps de calcul et augmentant la consommation d'énergie, nuisant à la réactivité et à l'efficacité du système [36].

2.5.5.3 SOPR

Le protocole SOPR (Secure Optimal Path Routing) vise à assurer un routage fiable et sécurisé au sein d'un WBAN (Wireless Body Area Network). Il utilise l'algorithme BEER (Balanced and Reliable Energy Efficiency) ainsi qu'un algorithme de chiffrement basé sur des mots de passe à usage unique et des opérations de transition pour prévenir les attaques par rediffusion. Une approche de modélisation énergétique est également proposée pour renforcer la sécurité et réduire la consommation d'énergie. Le protocole de chiffrement permet l'authentification des nœuds pour détecter les nœuds malveillants et empêcher leur participation aux communications ou au routage. Les

noeuds du réseau sont regroupés avec un CH spécifique sélectionné pour chaque cluster en fonction de son niveau élevé d'énergie et de son absence d'activités malveillantes. Cependant, toute compromission des clés de chiffrement ou des mécanismes de sécurité pourrait compromettre l'intégrité et la confidentialité des données transitant dans le réseau [37].

2.5.5.4 IMCMR-UWSN

L'algorithme IMCMR-UWSN (Integrated Multi-Cluster Multi-Route for Underwater Wireless Sensor Networks) vise à optimiser l'organisation des noeuds en clusters, à déterminer les chemins les plus courts pour le transfert des données, et à choisir les CH et les itinéraires optimaux pour atteindre la destination. Il repose sur deux processus principaux : le clustering via l'algorithme CKHA (Chaotic krill head algorithm) et le routage multi-sauts via SA-GSO (Self-adaptive glow worm swarm optimization algorithm). CKHA identifie les CH et organise les clusters en fonction de divers paramètres, tandis que SA-GSO ajuste une fonction prenant en compte l'énergie restante, le retard, la distance et la confiance. Cette technologie améliore considérablement l'efficacité énergétique et la durée de vie des réseaux de capteurs sous-marins sans fil. Néanmoins, l'incorporation du routage multi-sauts CKHA et SA-GSO peut engendrer une complexité algorithmique élevée, compliquant ainsi l'implémentation et la maintenance [38].

Tableau 2.5 présente une comparaison des algorithmes selon plusieurs mesures clés.

Algorithme	Densité	Stabilité	Latence	Surcharge	Overlapping	Complexité
LBRP	Faible	Moyenne	Faible	Élevé	Faible	Moyenne
TACM	Moyenne	Faible	Moyenne	Élevé	Faible	Élevé
SOPR	Moyenne	Élevé	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne
IMCMR-UWSN	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Élevé

TABLE 2.5 – Comparaison des algorithmes de clustering basés sur la destination.

2.5.6 Discussion

Dans le domaine des RCSF basés sur l'IoT, divers algorithmes de clustering sont largement utilisés pour gérer efficacement les données. Parmi les plus réputés, on trouve LEACH et k-means, reconnus pour leur capacité à prolonger la durée de vie du réseau

tout en segmentant efficacement les données. Cependant, ces algorithmes font face à plusieurs défis, tels que leur sensibilité aux environnements changeants, leur complexité de mise en œuvre, leur évolutivité et leur capacité à gérer les nœuds défectueux ou malveillants. L'évaluation de leurs performances repose sur diverses métriques telles que la durée de vie du réseau, la consommation d'énergie, la stabilité des clusters, la latence, la surcharge et la complexité. Malgré les progrès accomplis, des lacunes persistent, notamment en ce qui concerne l'adaptabilité aux environnements dynamiques, la gestion de la sécurité et de la confidentialité des données, ainsi que l'amélioration de l'évolutivité des grands réseaux, nécessitant ainsi une exploration plus approfondie dans le domaine de l'IoT.

2.6 Conclusion

Ce chapitre propose une analyse exhaustive des algorithmes de clustering dans les RCSF basés sur l'IoT. Nous avons offert un aperçu de la technologie de clustering dans ces systèmes, couvrant le processus d'assemblage, les fondements, les caractéristiques du clustering, la structure des clusters, les métriques pour la sélection des CH, les flux procéduraux généraux, les mesures de performance et l'approche des algorithmes de clustering. En outre, nous avons introduit une nouvelle classification des algorithmes de clustering, avec une description détaillée de chaque algorithme. Cette étude nous permettra de capitaliser sur les algorithmes existants pour proposer un nouvel algorithme de clustering optimisé, dans le but d'améliorer les performances des RCSF basés sur l'IoT. La conception et la description détaillée de cet algorithme seront discutées dans le prochain chapitre de notre mémoire.

Chapitre 3

Contribution

3.1 Introduction

Comme évoqué précédemment, divers algorithmes sont disponibles pour désigner un CH. Dans ce travail, nous proposons une amélioration de l’algorithme EE-WCA afin de surmonter certaines de ses limitations. Notre approche vise à relever les défis rencontrés par l’algorithme EE-WCA en mettant l’accent sur l’efficacité énergétique, la stabilité globale et la complexité de calcul. Nous détaillons les différentes phases de notre algorithme, de la sélection des nœuds maîtres du cluster à la maintenance du cluster. Nous examinons également les paramètres fondamentaux utilisés pour choisir les CH. Pour mieux illustrer le fonctionnement de notre algorithme amélioré, nous fournissons un exemple concret. En outre, nous analysons la complexité de notre méthode en termes de charge de messages générée à chaque étape. L’objectif principal de cette démarche est de contribuer de manière significative à la recherche sur la gestion des ressources dans les RCSF en proposant une solution plus robuste et plus efficace pour la formation de clusters.

3.2 Algorithme EE-WCA

L’IoT représente un nouveau paradigme et une solution prometteuse pour accroître les performances des RCSF. Au cours des dernières années, il a suscité un intérêt considérable de la part de nombreux chercheurs. En réponse à cela, de nombreux mécanismes de contrôle ont été proposés pour relever les défis inhérents à ces réseaux, notamment

la topologie dynamique, les problèmes d'évolutivité et la complexité de mise en œuvre. Le clustering, en tant que mécanisme important, a significativement amélioré les performances dans diverses applications. Par exemple, l'EE-WCA a été développé pour améliorer la qualité de service des RCSF. Cet algorithme comporte deux étapes principales, illustrées à la Figure 3.1 : d'abord, l'évaluation de la qualité de service des nœuds afin de sélectionner un CH performant, puis la mise à jour du CH pour assurer une utilisation équilibrée des ressources limitées. La qualité des nœuds capteurs est évaluée en se basant sur cinq paramètres de qualité de service [31] :

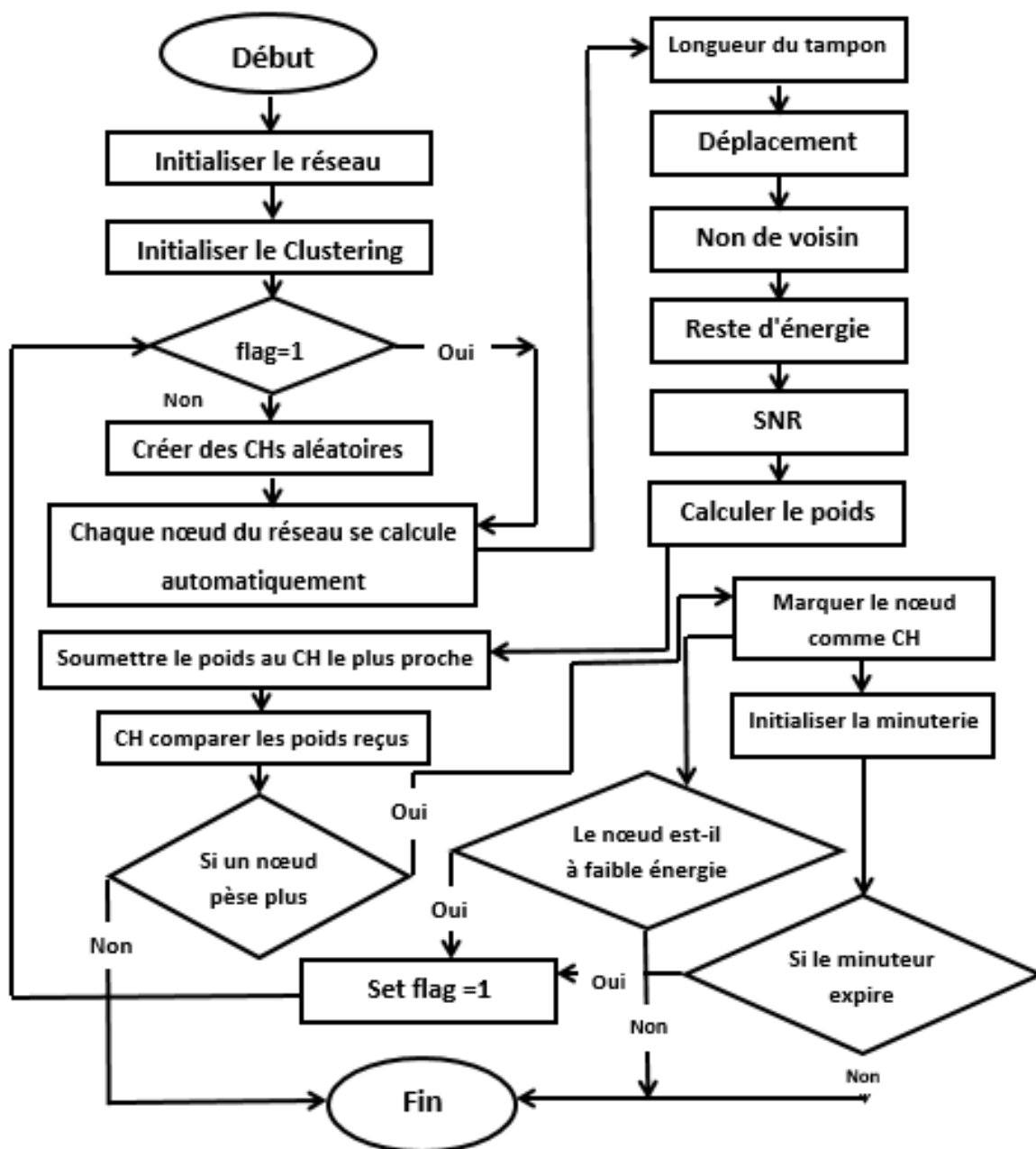


FIGURE 3.1 – Organigramme de l'algorithme EE-WCA.

1. **Longueur du tampon** : La capacité de communication des nœuds est impactée par la taille de leur tampon, nécessaire pour stocker et transmettre les paquets. Pour évaluer cette utilisation, nous nous appuyons sur l'équation 3.1, où B désigne la taille totale du tampon et X la quantité de tampon utilisée lors de la communication.

$$F = B - X \quad (3.1)$$

Où F représente la capacité libre du tampon et est utilisée en fonction de la condition suivante (Équation 3.2) :

$$F = \begin{cases} \geq B * 0,2 & \text{Considérer le nœud} \\ < B * 0,2 & \text{Le nœud est surchargé} \end{cases} \quad (3.2)$$

2. **Déplacement des nœuds** : Le mouvement des nœuds représente leur mobilité individuelle. Une faible mobilité peut prolonger la capacité d'un nœud à fournir des services comme un CH. Pour évaluer ce mouvement, on suppose que le nœud A , initialement en position (x_1, y_1) à t_1 , se déplace vers (x_2, y_2) à t_2 , après un laps de temps donné $\Delta_t = t_2 - t_1$. Par conséquent, le déplacement du nœud est calculé à l'aide de l'équation 3.3 :

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3.3)$$

Où d représente le déplacement d'un nœud à l'instant Δ_t .

3. **Niveau de batterie** : Une batterie bien chargée est essentielle pour assurer le bon fonctionnement du nœud capteur, notamment pour être choisi comme CH. Pour évaluer cela, on examine le taux de changement d'énergie. Supposons qu'au moment t_1 , le nœud A ait une énergie initiale e_1 . Après un certain temps Δt ou au moment t_2 , l'énergie restante est devenue e_2 . Le taux de changement d'énergie est alors défini par l'équation 3.4 :

$$\Delta_e = \frac{|e_2 - e_1|}{\Delta_t} \quad (3.4)$$

4. **Connectivité** : La connectivité est également appelée degré de nœud. Elle représente le nombre de nœuds à portée du nœud sélectionné. Ainsi, ces nœuds

peuvent communiquer directement avec le nœud principal. La connexion où le degré est noté D .

5. **Rapport Signal sur Bruit (SNR) :** Cette métrique représente le rapport entre le bruit et les signaux d'information. Lorsque la communication entre deux nœuds capteurs est perturbée par un bruit important, la transmission des informations devient complexe. Par conséquent, nous intégrons le SNR comme paramètre de qualité de service. Pour évaluer le SNR, nous utilisons l'Équation 3.5 :

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \right)^2 \right] = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \right) = (A_{\text{signal}} - A_{\text{noise}}) \quad (3.5)$$

En utilisant ces paramètres, les poids sont calculés selon l'équation 3.6, ce qui permet de déterminer le CH optimal. Cependant, l'algorithme EE-WCA rencontre des défis, car l'évaluation de cinq critères de qualité de service nécessite plus de temps de calcul et une consommation d'énergie accrue pour la formation des clusters et la sélection de CH. A cet effet, nous proposons d'améliorer cet algorithme pour résoudre ces problèmes.

$$W = \left| \frac{(F_A - F_{\min})}{(F_{\max} - F_{\min})} \right| - \left| \frac{(d_A - d_{\min})}{(d_{\max} - d_{\min})} \right| - \left| \frac{\Delta_{e_A} - \Delta_{e_{\min}}}{\Delta_{e_{\max}} - \Delta_{e_{\min}}} \right| + \left| \frac{(D_A - D_{\min})}{(D_{\max} - D_{\min})} \right| + \left| \frac{(SNR_A - SNR_{\min})}{(SNR_{\max} - SNR_{\min})} \right| \quad (3.6)$$

tel que :

- F : indique la longueur du tampon.
- d : décrit le déplacement du nœud.
- e : montre l'énergie du nœud du réseau.
- D : montre le degré d'un nœud.
- SNR : affiche le rapport signal/bruit.

3.2.1 Avantages de l'algorithme EE-WCA

L'algorithme EE-WCA présente plusieurs avantages, que nous exploitons dans la proposition de notre approche :

- **Amélioration des performances** : L'approche EE-WCA améliore les performances du réseau en réduisant les collisions de paquets, en optimisant l'utilisation du canal et en diminuant les délais de transmission.
- **Flexibilité** : EE-WCA est adaptable à diverses topologies de réseau et peut être déployé dans différents environnements et applications de RCSF.
- **Équilibrage de la charge** : L'algorithme garantit une mise à jour périodique des nœuds CH pour éviter toute surcharge, favorisant ainsi une utilisation plus efficace des ressources et une durée de vie prolongée du réseau.

3.2.2 Limitations de l'algorithme EE-WCA

Cependant, l'algorithme EE-WCA rencontre également plusieurs défis qui affectent significativement certaines performances des RCSF. Ces défis incluent :

- **Complexité computationnelle accrue** : L'évaluation de cinq critères de qualité de service pour chaque nœud capteur dans le protocole EE-WCA entraîne des retards de traitement et une consommation supplémentaire de ressources, ce qui peut conduire à des inefficacités opérationnelles et à un épuisement rapide des batteries.
- **Formation des clusters** : L'algorithme EE-WCA manque de spécifications détaillées pour l'identification et la création des clusters, et ne fournit pas d'étapes précises pour déterminer les critères de regroupement des nœuds.
- **Gestion de la maintenance** : L'algorithme présente une lacune en termes de maintenance, car il ne prévoit pas de surveiller les nœuds en cas de panne ou de perte de communication avec l'un d'entre eux, qu'il s'agisse d'un CH ou d'un CM non reconnu.

Par la suite, nous examinerons l'approche proposée, en spécifiant d'abord les hypothèses de travail, suivies d'une présentation générale de cet algorithme. Ensuite, nous fournirons une description approfondie des avancées réalisées par notre approche proposée, et également nous introduirons un exemple illustratif de cette approche. Enfin, nous mènerons une validation théorique pour confirmer la rationalité de l'approche proposée.

3.3 Approche proposée : A-EE-WCA

Dans cette section, nous décrivons en détail l'approche que nous avons améliorée pour relever le défi de la sélection des nœuds CH au sein des RCSF. Cette approche, appelée A-EE-WCA (Advanced Energy Efficient Weighted Clustering Algorithm), est considérée comme une amélioration de l'algorithme EE-WCA. Nous commençons par énoncer les hypothèses sur lesquelles repose notre approche. Ensuite, nous décrivons de manière générale les objectifs visés par l'algorithme proposé. Par la suite, nous proposons une explication détaillée de l'algorithme, mettant en lumière les différents types de nœuds utilisés ainsi que le déroulement spécifique de l'algorithme.

Comme illustré dans la Figure 3.2, la structure du réseau se divise en deux parties distinctes : la première partie est le réseau d'accès, comprenant des nœuds et des BS, tandis que la seconde partie est le réseau cœur, englobant le Cloud Computing (CC), Internet et le Network Control Center (NCC).

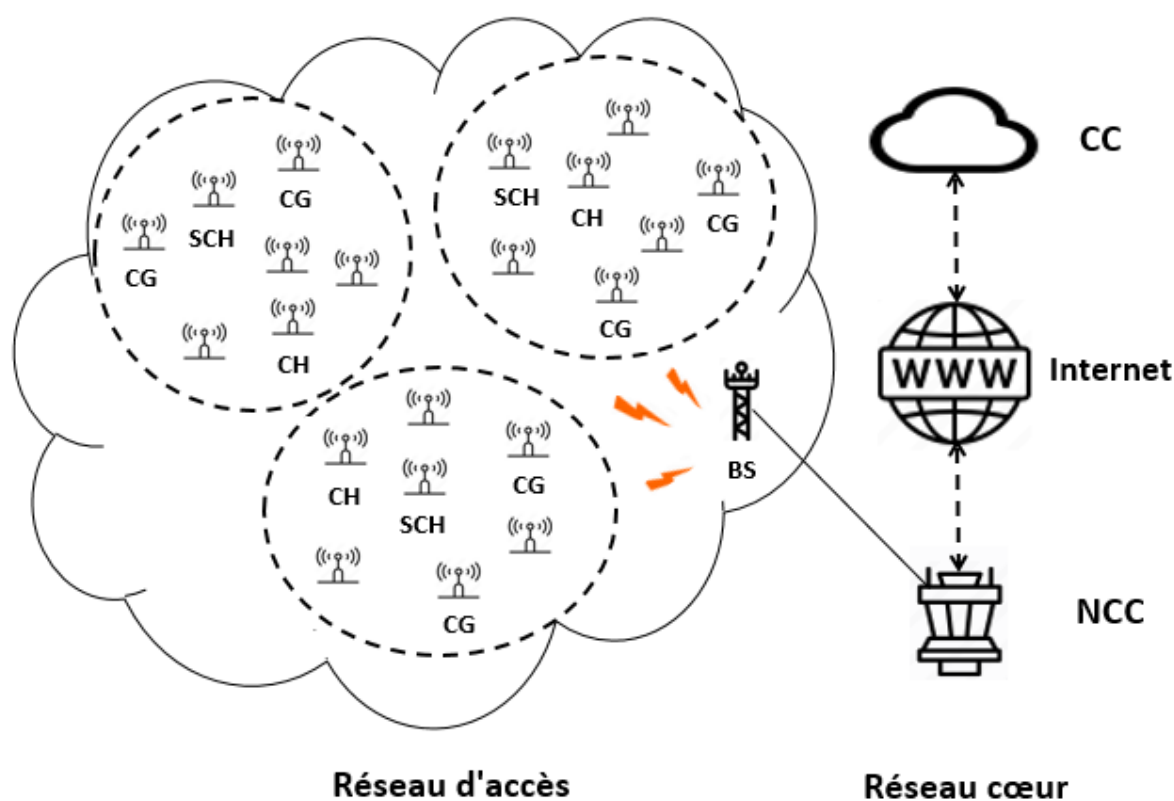


FIGURE 3.2 – Architecture de réseau pour l'approche proposée.

3.3.1 Hypothèses

Notre proposition est basée sur les hypothèses suivantes :

- Chaque nœud est capable de déterminer sa position actuelle et sa portée de transmission à l'aide d'un dispositif GPS intégré.
- Les capteurs sont placés de façon statique, et leur position demeure constante pendant l'exécution de l'algorithme.
- Tous les capteurs présentent des caractéristiques homogènes en ce qui concerne leurs capacités de traitement, leur mémoire et leur consommation électrique.

3.3.2 Description générale et les objectifs de l'approche proposée : A-EE-WCA

Notre algorithme a pour but de réaliser plusieurs objectifs clés. Initialement, il cherche à établir une procédure de sélection des CH à la fois efficace et fondée sur trois critères primordiaux. Ensuite, l'objectif est de mettre en œuvre une stratégie de formation de cluster, visant à organiser les nœuds du réseau en groupes homogènes, ce qui est essentiel pour améliorer la communication et la coordination entre eux. Les détails de ces objectifs seront expliqués ultérieurement.

L'algorithme que nous proposons pour le RCSF s'articule autour de deux sous-objectifs principaux pour optimiser les performances du réseau.

1. **Premièrement**, la sélection des CH est cruciale pour le succès de notre stratégie. Nous avons développé une méthode de sélection basée sur trois métriques essentiels :

- L'énergie résiduelle des nœuds, favorisant ceux ayant une plus grande réserve d'énergie pour assurer une durabilité accrue du réseau.
- La capacité du tampon des nœuds, qui prend en compte la différence entre la taille totale du tampon et son utilisation courante, permettant d'évaluer leur aptitude à gérer l'envoi, la réception, et la transmission de paquets.
- La proximité géographique et la distance relative des nœuds permettent d'élire des CH situés au plus près de tous les membres du cluster.

Ces critères assurent une sélection optimale des CH, permettant une répartition équilibrée dans le réseau tout en optimisant leur efficacité et leur nombre.

2. **Deuxièmement**, la formation des clusters et leur maintenance représentent un aspect fondamental de notre approche. Après la sélection des CH, chaque coordinateur doit identifier et intégrer les nœuds membres dans son cluster. Cette étape est vitale pour structurer le réseau en clusters cohérents, regroupant les nœuds selon leur proximité géographique pour faciliter une communication efficace. En outre, une gestion rigoureuse de la maintenance au sein de chaque cluster est impérative pour garantir la pérennité du réseau. Cela inclut l'optimisation de la durée de vie des capteurs et la minimisation des interruptions de service, assurant ainsi la fiabilité et l'efficacité du réseau sur le long terme.

Nous discuterons des détails techniques et des implications de ces stratégies dans les sections suivantes, en mettant en lumière comment elles contribuent à l'optimisation globale du RCSF.

3.3.3 Description détaillée de l'approche proposée : A-EE-WCA

Dans cette section, nous explorerons les différents types de nœuds qui contribuent à une structure réseau optimisée et à une communication transparente. Chaque catégorie de nœuds joue un rôle crucial, que ce soit en coordonnant les membres du cluster ou en facilitant les échanges entre les clusters. De plus, nous examinerons en détail les six étapes de l'algorithme, de l'identification des nœuds à la maintenance du clustering.

3.3.3.1 Types de nœuds utilisés dans notre approche

Notre approche, basée sur une technique de clustering, utilise différents types de nœuds pour optimiser le réseau, chacun jouant un rôle spécifique dans son fonctionnement.

- **Cluster Head (CH)** : Un nœud CH coordonne les membres du cluster et assure les communications intra-cluster, collectant les données des nœuds du cluster et les transférant vers des destinations spécifiques, telles que la station de base ou le nœud suivant.
- **Secondary Cluster Head (SCH)** : C'est un nœud sélectionné par le CH parmi les membres du cluster, qui fonctionne comme un CH secondaire. Il peut être activé en cas de panne du nœud CH principal ou pour partager la charge de travail.

- **Cluster Gateway (CG)** : Le nœud Le CG joue le rôle de passerelle en facilitant les échanges de données et la communication inter-cluster, assurant ainsi une communication fluide dans le réseau.
- **Cluster Member (CM)** : Les CM sont les nœuds réguliers surveillés par le CH. Ils forment la majorité du réseau et transmettent régulièrement des informations et des données à leur CH.
- **Station de base (BS)** : Un dispositif de transmission ou de réception implanté dans une zone géographique spécifique pour fournir des services de communication sans fil à l'ensemble des nœuds formant le RCSF.

3.3.3.2 Notations

Les différentes notations utilisées dans l'approche proposée sont données dans le Tableau 3.1.

Symboles	Description
id_i	Identité du nœud i
VS_i	Voisins d'un seul saut du nœud i
deg_i	Degré du nœud i
E_{resi}	Énergie résiduelle du nœud i
E_{RR_i}	Énergie résiduelle relative du nœud i
D_{R_i}	Distance relative du nœud i
LT_{R_i}	Longueur du tampon relatif du nœud i
P_i	Position du nœud i
W_i	Poids du nœud i
CH_i	Chef de cluster du cluster i
CM_liste_i	Liste des membres du cluster i

TABLE 3.1 – Notations utilisées dans cette approche.

3.3.3.3 Types de messages

Notre approche utilise plusieurs types de messages. Le Tableau 3.2 décrit les différents types de messages.

3.3.3.4 Déroulement de l'algorithme

L'algorithme A-EE-WCA se compose de plusieurs phases distinctes. Tout d'abord, il commence par l'identification des nœuds, puis procède à la découverte des voisins.

Message	Source	Destination	Description
SALAM	BS	Nœud	Notification des nœuds
PRESENT	Nœud	VS _i	Échanger les informations
POIDS	Nœud	VS _i	Échanger les poids calculés
ANNONCE	CH	BS	Annonce des nouveaux CH
REPONSE	Nœud	CH	Confirmer la rejoindre

TABLE 3.2 – Types de messages dans cette étude.

Enfin, il aborde l'élection du CH, étape essentielle qui implique la formation des clusters et la maintenance. Chacune de ces étapes revêt une importance capitale dans le bon fonctionnement et la performance globale de l'algorithme.

1. Identification :

Au moment de son entrée dans le réseau, un nœud active son système GPS et la BS émet un message de salutation (SALAM) contenant ses informations d'identification et de localisation. Lorsqu'un nœud entre dans la zone de couverture d'une BS et reçoit ce message, il envoie une demande pour s'enregistrer dans le réseau. Une fois que la BS reçoit la demande, elle la transmet au NCC pour vérifier l'enregistrement du nœud et lui attribuer une adresse IP en envoyant un message de confirmation. Lorsque le nœud reçoit cette confirmation, il entre dans l'état UN et démarre. Ensuite, l'algorithme de clustering est exécuté, comme illustré dans la Figure 3.3.

2. **Découverte de voisinage** : Chaque nœud dans le réseau effectue des calculs pour déterminer les paramètres suivants : l'énergie résiduelle, qui est notre propre contribution, la longueur du tampon, et attribue ses coordonnées de position $P(x_1, y_1)$ à l'aide du système de positionnement GPS. Ensuite, chaque nœud envoie un message PRESENT à ses voisins à une distance d'un saut (VS), contenant (son id, son emplacement, l'énergie résiduelle et la longueur du tampon), tel que démontré par la Figure 3.4.

(a) **Énergie résiduelle (E_{res})** : L'énergie résiduelle du nœud est calculée à l'aide de l'équation 3.7, qui constitue un paramètre important pour augmenter la durée de vie du réseau. Cette équation prend en compte l'énergie initiale du nœud (E_{init}) ainsi que l'énergie qu'il a consommée (E_{cons}) :

$$E_{res} = E_{init} - E_{cons} \quad (3.7)$$

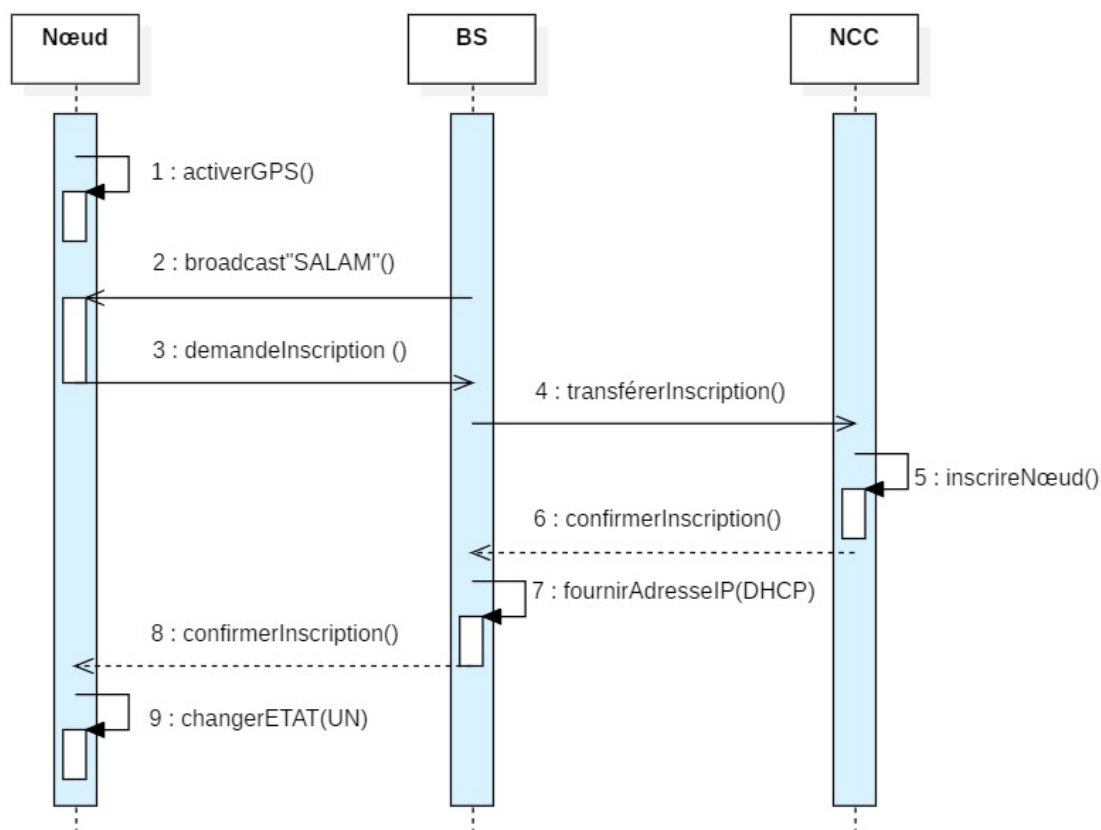


FIGURE 3.3 – Diagramme de séquence d'identification des nœuds.

- (b) **Longueur du tampon (LT)** : Chaque nœud dispose de sa propre longueur de tampon pour stocker et transmettre des paquets. Pour évaluer cette taille, nous définissons B comme la capacité totale du tampon et X comme la quantité de tampon utilisée lors des communications, conformément à l'équation 3.8 :

$$LT = B - X \quad (3.8)$$

3. Élection des CH :

Pour sélectionner le CH, chaque nœud calcule son poids en évaluant les paramètres suivants : énergie résiduelle relative, distance relative et longueur relative du tampon. Si son poids est le plus élevé, le nœud doit actualiser son statut auprès du CH et inclure tous les autres nœuds dans sa liste de CM (CM-liste). Dans le cas contraire, il choisit le nœud ayant le poids maximal pour diriger le cluster et actualise sa variable Mon-CH avant de passer à la phase d'affiliation. Si plusieurs nœuds ont le poids maximal, celui avec l'identifiant le plus bas est

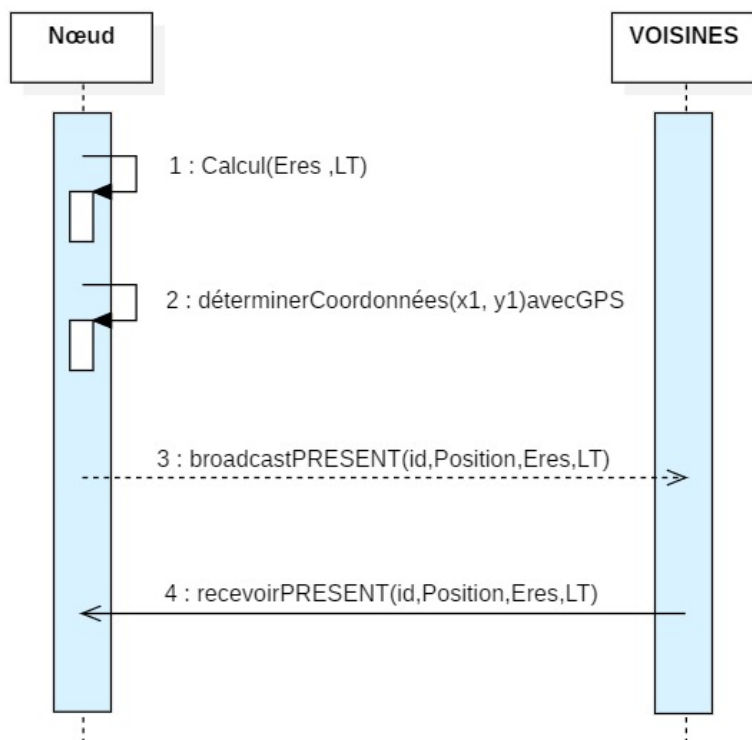


FIGURE 3.4 – Diagramme de séquence de découverte de voisinage.

sélectionné, tel que présenté dans la Figure 3.5.

- (a) **Degré du nœud** (deg_i) : Il indique la taille de l'ensemble des voisins d'un seul saut du nœud i , noté VS_i , où cela est défini par l'équation 3.9 :

$$VS_i = \{j \in V | \exists(i, j) \in E\} \quad (3.9)$$

Ainsi, le degré du nœud i est défini selon l'équation 3.10 :

$$deg_i = |VS_i| \quad (3.10)$$

- (b) **Energie résiduelle relative** (E_{RR}) : Pour évaluer l'énergie résiduelle relative (E_{RR}) d'un nœud par rapport à ses voisins, nous commençons par calculer l'énergie totale (E_T) à l'aide de l'équation 3.11. Ensuite, nous déterminons (E_{RR}) en utilisant l'équation 3.12. L'indice d'énergie le plus élevé correspond à la valeur la plus élevée.

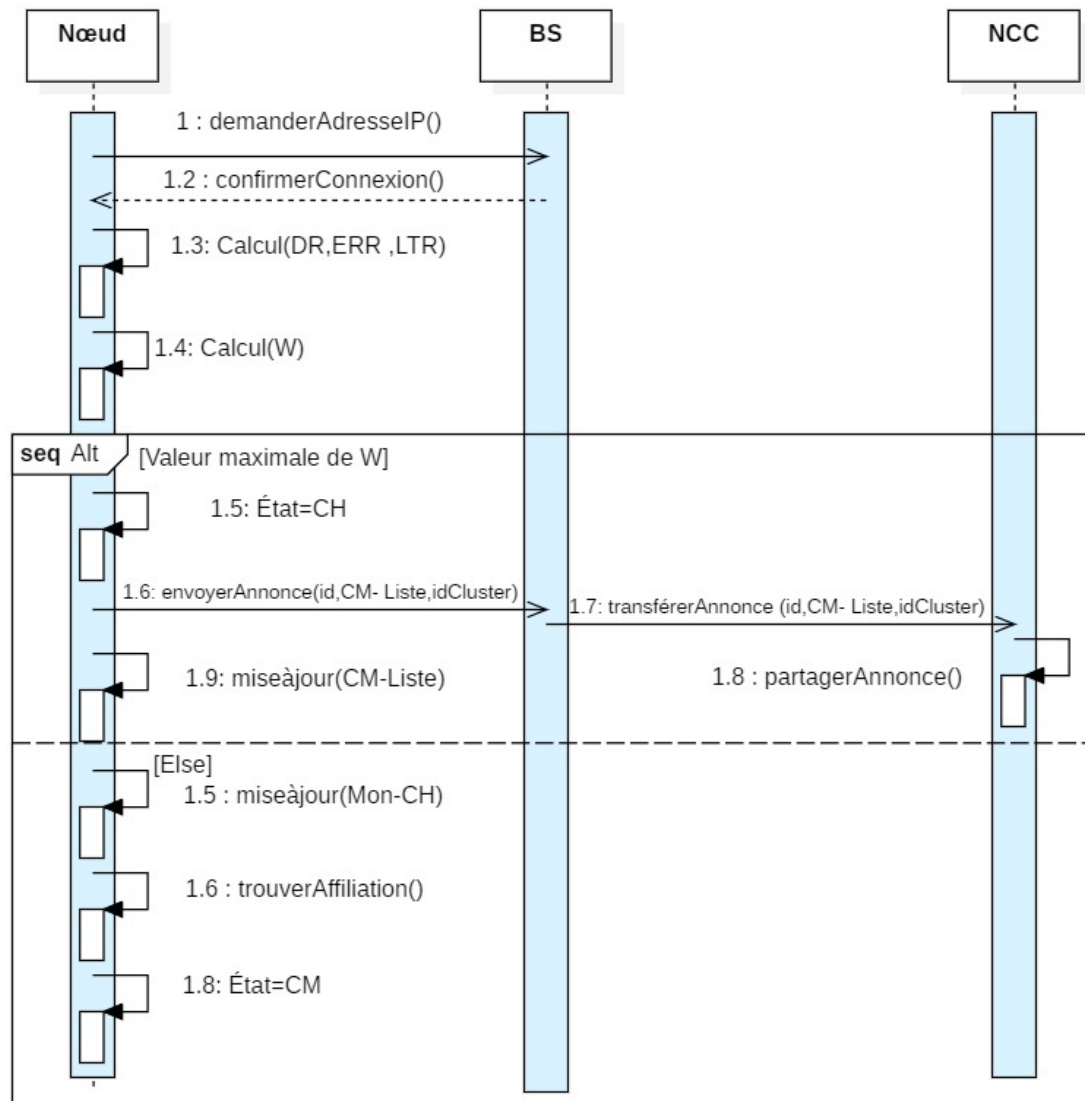


FIGURE 3.5 – Diagramme de séquence de l'élection de CH, l'annonce et l'affiliation.

$$E_T = \sum_{j=1}^{deg_i} E_{res_i} - E_{res_j} \quad (3.11)$$

$$E_{RR} = \frac{E_T}{deg_i} \quad (3.12)$$

(c) **Longueur du tampon relatif (LT_R) :**

Pour évaluer la longueur relative du tampon (LT_R) d'un nœud, où la valeur la plus élevée est considérée comme un indicateur, nous commençons par calculer la longueur totale du tampon (LT_T) en utilisant l'équation 3.13.

Ensuite, nous obtenons (LT_R) selon l'équation 3.14.

$$LT_T = \sum_{j=1}^{deg_i} LT_i - LT_j \quad (3.13)$$

$$LT_R = \frac{LT_T}{deg_i} \quad (3.14)$$

(d) **Distance relative (D_R) :**

Calculer la distance relative (D_R) entre un nœud et ses VS. Le nœud qui présente la distance moyenne minimale aura l'indice de distance le plus élevé. Pour le nœud i , la D_R est calculée comme la distance quadratique moyenne cumulée de ses VS divisée par son deg_i , comme décrit dans l'équation 3.15.

$$D_R = \frac{1}{deg_i} \sum_{j=1}^{deg_i} \sqrt{((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)} \quad (3.15)$$

Finalement, le poids W est calculé en fonction des paramètres précédents selon l'équation 3.16 :

$$W = \alpha \times E_{RR} + \beta \times \frac{1}{D_R} + \gamma \times LT_R \quad (3.16)$$

Où α , β et γ sont des coefficients constants tel que $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

L'algorithme 1 décrit le déroulement de la phase d'élection des CH.

4. Formation des clusters :

Chaque nœud désigné comme CH doit signaler son élection. Par conséquent, il essaie d'établir une connexion et envoie un message ANNONCE aux CM, incluant son id, la CM-liste, ainsi que l'identifiant de cluster dans le réseau.

Ensuite, chaque nœud reçoit un message d'annonce du CH et le compare avec son propre CH. S'ils correspondent, le nœud envoie un paquet de réponse à ce CH et met à jour son statut en tant que CM ainsi que son identifiant de cluster. Dans le cas contraire, le nœud ignore le message et passe à la phase de maintenance pour rejoindre le cluster approprié. Par ailleurs, chaque CH, après réception de tous les paquets de réponse, met à jour sa liste de CM. Enfin, chaque CH doit sélectionner le nœud avec le poids le plus élevé parmi les CM, à l'exception de lui-même, pour être le SCH, et également choisir deux autres nœuds les plus éloignés

Algorithm 1 Élection des CH

```

etati : État du nœud i
VSi : Ensemble des voisins du nœud i
id - CH : Variable contient l'identifiant du CH du nœud i
degi ← |VSi|
CM_listei : Liste des membres du cluster du CH i
CM_listei ← 0;
Calcule du poids W basé sur les équations 3.11 à 3.16;
Diffusion du DEMANDE(idi, Wi);
Réception du DEMANDE(id, W) messages des voisins;
max - W ← max(Wi, Wj, ..., Wm);
id - maxW ← identifiant du nœud ayant la plus grande valeur de W;
if Wi = max - W then
  | id - CH ← idi;
  | etati ← CH;
  | Diffusion de l'ANNOUNCE(idi);
  | Réception du REPONCE(id) messages des voisins;
  | for REPONSE(idj) message do
  | | CM_listei ← CM_listei ∪ {idj}
  | end
  | max - W ← maxW(CM_liste);
  | id - maxW ← id du nœud ayant la valeur max-W;
else
  | id - CH ← id - maxW;
  | Réception de l'ANNOUNCE(idi) messages des CH;
  | if idj = id - CH then
  | | Envoi du REPONCE (idi) message à CH;
  | | etati ← CM;
  | end
end

```

pour être les CG. Le CH envoie ensuite un message de nomination aux nœuds correspondants. Les nœuds qui reçoivent ce message de nomination mettent à jour leur statut pour devenir SCH ou CG.

5. Maintenance :

En raison des défaillances des nœuds dues à l'épuisement de leur énergie, à des problèmes techniques ou à l'ajout de nouveaux nœuds capteurs au réseau, la stabilité des clusters est impactée. L'objectif de cette phase est de garantir la stabilité et la continuité de la structure du cluster sur une période prolongée. Ainsi, plusieurs événements sont déclenchés au niveau du cluster pour assurer sa maintenance. Ces événements et leurs actions de maintenance associées sont décrits comme suit :

— **Quitter le cluster :**

Chaque CH surveille activement les CM de son cluster en établissant des échanges périodiques de messages pour maintenir un suivi constant. Lorsqu'un CM tombe en panne ou que son énergie est épuisée, le CH détecte cet événement et le supprime immédiatement de sa liste. En revanche, si un CM ne reçoit pas de manière opportune le message périodique de son CH dans le délai T en raison d'une défaillance ou d'un épuisement de l'énergie du CH, il doit alors changer son statut en UN et rejoindre un autre cluster.

— **Rejoindre un cluster :**

Lorsqu'un nœud UN souhaite rejoindre un cluster, il envoie une requête comprenant sa position et son poids au CG le plus proche. Le CG transfère cette requête d'adhésion à son CH. Si le CH approuve la demande, il intègre ce nœud dans sa liste de CM et envoie une réponse confirmant son admission au cluster. Ainsi, ce nœud modifie son statut pour devenir CM et rejoint le cluster. De plus, le CH doit envoyer un message de mise à jour à ses CM pour les informer de ce changement.

3.3.4 Exemple illustratif de L'approche proposée A-EE-WCA

La Figure 3.6 présente un exemple du processus de clustering de notre algorithme proposé, avec 10 nœuds capteurs. Les différents paramètres associés aux nœuds sont résumés dans le Tableau 3.1.

Initialement, chaque nœud diffuse un message "PRÉSENT" contenant son (id , emplacement, E_{res} et LT) à ses VS (Figure 3.6b). Ensuite, chaque nœud calcule son poids et le transmet à ses voisins pour permettre à chaque nœud de comparer son poids avec celui des autres nœuds (Figure 3.6c). Si son poids est le plus élevé, le nœud annonce l'élection d'un nouveau CH (dans cet exemple, les nœuds 1 et 8 seront annoncés comme CH) (Figure 3.6d). Pour les autres nœuds, ils choisissent le nœud ayant le poids le plus élevé parmi leurs voisins comme le nouveau CH (Figure 3.6e). Ainsi, après réception du message d'annonce du CH, chaque nœud répond en envoyant un message de réponse. Si un nœud reçoit deux messages

d'annonce ou plus, il répond au nœud ayant le poids le plus élevé (par exemple, le nœud 7 a reçu deux messages d'annonce de 1 et 8 et a choisi 8).

À la fin du processus de clustering, deux clusters sont formés : le cluster 1 (CH : 1 ; CM : 2, 3, 4, 5, 6) et le cluster 2 (CH : 8 ; CM : 7, 9, 10) (voir Figure 3.6f).

Dans cet exemple, en supposant que : $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.2$, $\gamma = 0.3$.

Id	Voisines	E_{RR}	D_R	LT_R	Poids	CH
1	2,3,4,5,6,7	2.33	3.54	4	3.06	-
2	1,7	0.5	5.64	0.5	1.53	1
3	1	-2	6.7	-3	-0.56	1
4	1,5	-0.5	5.88	-2	0.33	1
5	1,4	-2	4.58	-2	-0.68	1
6	1	-2	9.48	-6	-1.91	1
7	1,2,8	-3	4.03	-5	-2.7	8
8	7,9,10	5	3.98	8.6	5.9	-
9	8	-4	3	-7	-3.5	8
10	8	-7	2.82	-8	-5.34	8

TABLE 3.3 – Paramètres des nœuds.

3.3.5 Avantages de notre approche A-EE-WCA

Notre approche A-EE-WCA plusieurs avantages significatifs qui contribuent à l'amélioration des performances du réseau :

1. **Optimisation énergétique** : L'algorithme privilégie la sélection des nœuds CH en fonction de leur niveau E_{RR} , ce qui vise à prolonger la durée de vie du réseau tout en minimisant la consommation énergétique.
2. **Simplification de la complexité computationnelle** : En se concentrant sur des critères de sélection de CH essentiels tels que E_{res} , la distance relative et LT , l'algorithme réduit la complexité computationnelle par rapport à d'autres approches.
3. **Stabilité du cluster améliorée** : Grâce à une phase de maintenance efficace, l'algorithme gère les entrées et sorties de nœuds ainsi que les défaillances potentielles, assurant ainsi la stabilité du cluster et favorisant des communications cohérentes et fiables au sein du réseau.
4. **Équilibrage de charge amélioré** : Notre approche équilibre la charge de travail

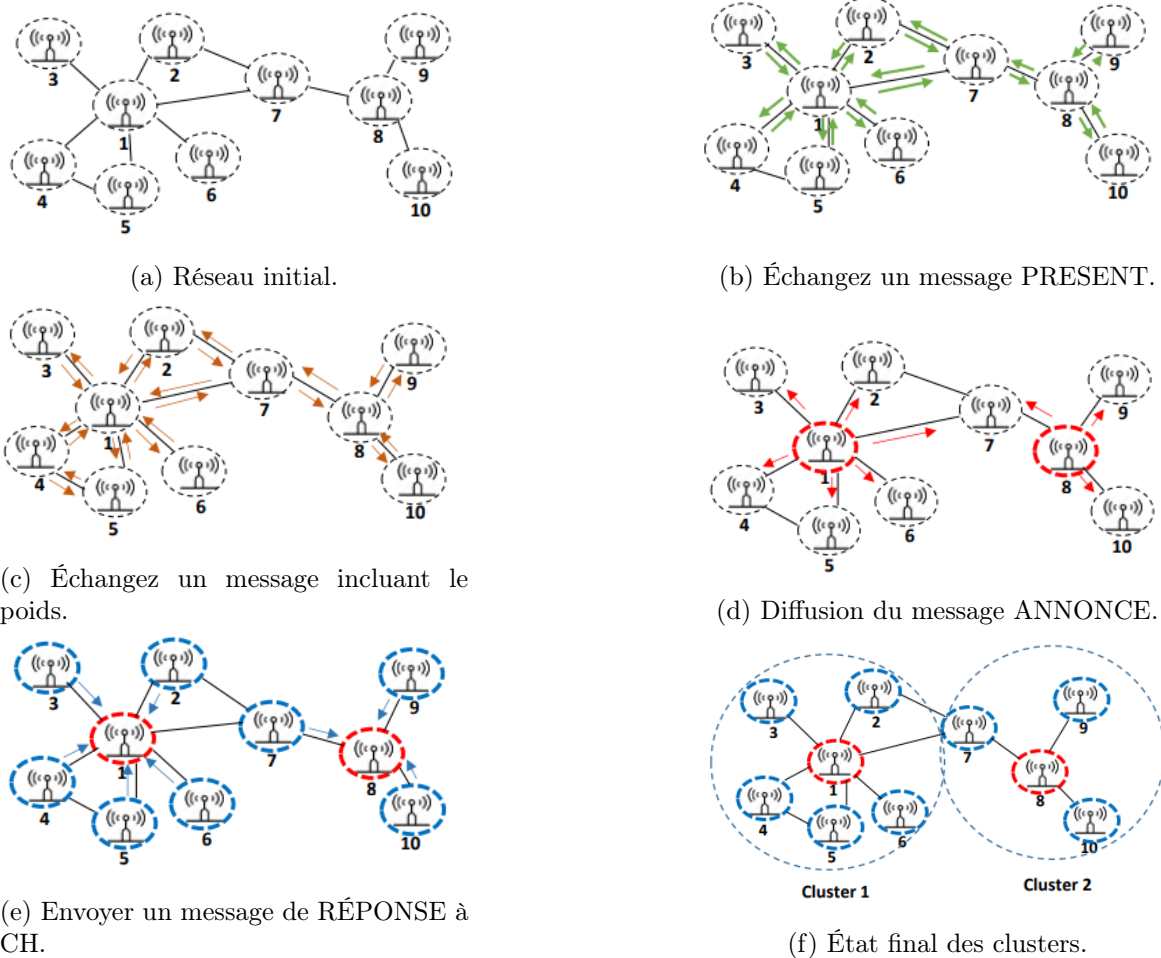


FIGURE 3.6 – Exemple montrant la phase de formation du cluster.

entre les nœuds du réseau, ce qui contribue à éviter les goulets d'étranglement et à maintenir des performances globales optimales.

- Adaptabilité aux environnements changeants :** En intégrant des mécanismes de prise de décision dynamiques, notre approche peut s'adapter efficacement aux changements de l'environnement du réseau, garantissant ainsi une efficacité continue dans des conditions variables.

3.3.6 Validation théorique

Dans cette section, nous effectuons une analyse théorique pour valider les bases et les hypothèses de notre approche.

3.3.6.1 Étude de la complexité des messages échangés pour l'algorithme A-EE-WCA

L'algorithme A-EE-WCA se compose de plusieurs phases distinctes. Examinons chaque phase pour calculer la complexité en termes de messages échangés.

1. Identification :

- Lorsqu'un nœud entre dans le réseau, il active son GPS et la BS envoie un message SALAM.
- Le nœud envoie une demande d'enregistrement à la BS.
- La BS transmet la demande au NCC.
- Le NCC vérifie l'enregistrement et envoie une confirmation via la BS au nœud.

Pour chaque nœud, cela représente 3 messages (demande d'enregistrement, transmission de la BS au NCC, confirmation du NCC). Pour N nœuds, le nombre total de messages échangés est :

$$3N \tag{3.17}$$

2. Découverte de voisinage :

- Chaque nœud envoie un message PRESENT à ses voisins directs (à une distance d'un saut).

Supposons que chaque nœud ait en moyenne D voisins directs. Pour N nœuds, le nombre total de messages échangés est :

$$N \times D \tag{3.18}$$

3. Élection de CH :

- Chaque nœud calcule son poids et envoie ce poids à ses voisins pour comparaison.
- Chaque nœud envoie son poids à D voisins.

Pour N nœuds, le nombre total de messages échangés est :

$$N \times D \tag{3.19}$$

4. **Annnonce :**

- Chaque nœud désigné comme CH envoie un message d'annonce aux membres de son cluster.
- Supposons qu'il y ait C clusters et que chaque cluster ait en moyenne $\frac{N}{C}$ nœuds.

Pour chaque CH, le nombre de messages échangés est :

$$C \times \frac{N}{C} = N \quad (3.20)$$

5. **Affiliation :**

- Chaque nœud qui reçoit un message d'annonce envoie un paquet de réponse au CH.
- Supposons qu'il y ait C clusters et que chaque cluster ait en moyenne $\frac{N}{C}$ nœuds.

Pour chaque CH, le nombre de messages échangés est :

$$C \times \frac{N}{C} = N \quad (3.21)$$

6. **Maintenance :**

- Chaque CH surveille les nœuds de son cluster et les nœuds envoient périodiquement des messages de statut.
- Supposons que chaque CH et CM envoie un message de maintenance à chaque période.

Le nombre de messages échangés pour la maintenance est proportionnel au nombre de nœuds :

$$N \quad (3.22)$$

7. **Complexité Totale :**

En additionnant les messages échangés dans chaque phase, la complexité totale en termes de messages échangés est :

$$3N + ND + ND + N + N + N = 3N + 2ND + 3N = 6N + 2ND \quad (3.23)$$

Ainsi, la complexité en termes de messages échangés pour l'algorithme A-EE-WCA est de :

$$O(ND) \quad (3.24)$$

où N est le nombre total de nœuds et D est le degré moyen des nœuds (nombre moyen de voisins directs).

3.3.6.2 Propriétés de clustering

Afin de prouver l'efficacité de l'approche proposée, il est nécessaire de vérifier les propriétés de clustering suivantes.

1. **Propriété de sûreté** : Chaque cluster possède un seul CH, et chaque nœud membre est associé à un cluster unique. Cette caractéristique garantit qu'un seul CH est assigné par cluster et qu'aucun nœud régulier n'appartient à plusieurs clusters simultanément. Cela assure l'absence d'incidents indésirables lors de l'exécution de l'algorithme de clustering.

— **Démonstration de la propriété :**

Un nœud est désigné comme un CH s'il répond aux critères suivants :

- (a) Il a le poids (W) le plus élevé par rapport à ses voisins.
- (b) En cas d'égalité de poids entre deux nœuds ou plus, le nœud avec l'id le plus bas est identifié comme le CH.

Cette sélection garantit qu'il existe un CH pour chaque cluster. De plus, chaque nœud non-CH sélectionne le nœud voisin ayant le poids le plus élevé comme son CH (choix local), puis envoie un message de confirmation au CH correspondant pour valider son adhésion après avoir reçu un message d'annonce de ce CH. Ainsi, chaque nœud appartient à un seul cluster, assurant ainsi la sûreté du système.

2. **Propriété de vivacité** :

La phase de formation de cluster se conclut de manière déterministe, assurant qu'à tout moment donné, chaque nœud se trouve dans l'un des états suivants : UN, CH, CM ou SCH. Cela garantit qu'aucun nœud ne reste indéfiniment dans un état intermédiaire et que le processus de clustering est complété efficacement.

— **Démonstration de la propriété :**

Pour démontrer cette propriété, la Figure 3.7 illustre les transitions d'état des nœuds d'un état à un autre, ce qui permet de prouver la propriété de vivacité : à tout moment donné, chaque nœud possède un état.

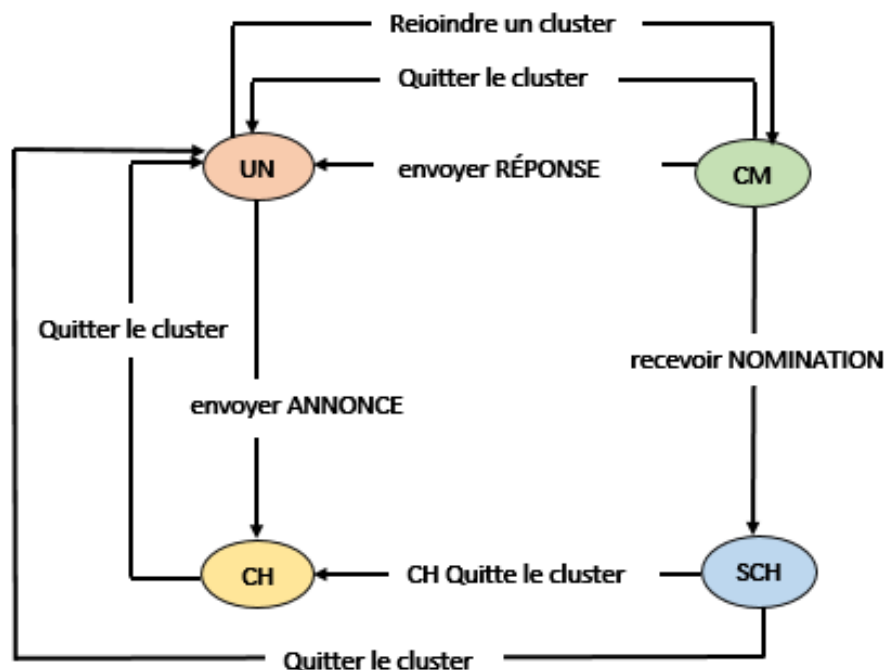


FIGURE 3.7 – Transition d'état des nœuds.

3.4 Conclusion

Ce chapitre examine l'algorithme EE-WCA, mettant en lumière ses forces et ses faiblesses. Une nouvelle approche A-EE-WCA est présentée avec des hypothèses claires et des objectifs définis. Cette approche décrit en détail son fonctionnement, incluant les types de nœuds utilisés et le déroulement de l'algorithme, avec un exemple pratique. Une analyse de la complexité relative aux messages et à la surcharge de communication a été effectuée, tout comme l'examen des propriétés de clustering. Ces aspects sont susceptibles d'améliorer les performances des RCSF, ouvrant ainsi la voie à des avancées significatives dans ce domaine.

Le chapitre suivant présente la simulation et l'évaluation des performances de notre approche proposée A-EE-WCA à l'aide des outils appropriés.

Chapitre 4

Simulation & Évaluation

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinons l'approche A-EE-WCA pour les RCSF en utilisant des simulations approfondies effectuées avec MATLAB. Nous adaptons les paramètres clés et analysons les résultats afin de mesurer son efficacité et son impact dans un contexte simulé. Nous détaillons également la méthode de sélection des CH basée sur des pondérations, en mettant en lumière des paramètres tels que E_{RR} , LT_R et D_R , qui sont cruciaux pour optimiser nos performances. Les simulations sont conduites en tenant compte de divers paramètres, tels que la durée de la simulation, la taille de la zone de déploiement et le nombre de nœuds. Les résultats obtenus, analysés à l'aide de graphiques et de mesures quantitatives, incluent la durée de vie du réseau, l'efficacité énergétique, le Taux de réussite de livraison de paquets (PDR) et la surcharge de clustering. Ces résultats fournissent des indications essentielles sur la robustesse et la fiabilité de notre approche. En conclusion, nous examinons les implications de ces résultats et discutons des orientations futures visant à améliorer les performances des RCSF et à développer des applications plus avancées dans divers domaines.

4.2 Environnement de simulation

L'environnement de simulation informatique est crucial en recherche et développement, permettant la modélisation et la simulation de systèmes, réseaux, algorithmes et processus dans un environnement virtuel contrôlé. MATLAB fait partie des simula-

teurs de réseau les plus largement utilisés. Les chercheurs et les développeurs utilisent ces simulations pour étudier le comportement des systèmes, évaluer les performances, tester des algorithmes et explorer de nouvelles idées. Ces environnements offrent une flexibilité et une précision qui permettent d'analyser et d'optimiser les solutions avant leur déploiement dans le monde réel. De plus, ils favorisent la reproductibilité et la comparaison des résultats, cruciales pour valider les solutions informatiques. Dans notre travail, nous avons adopté le simulateur MATLAB version R2018a pour mener nos simulations et analyses.

4.2.1 Configuration matérielle de la machine de simulation

L'appareil utilisé pour la simulation est équipé d'un processeur Intel(R) Core(TM) i7-7600U CPU cadencé à 2.80 GHz, avec une capacité d'accélération jusqu'à 2.90 GHz. Il dispose également d'une mémoire vive (RAM) de 16 Go et d'un stockage principal SSD de 512 Go. Le système est identifié par la référence LENOVO-MT-20HE-BU-Think-FM-ThinkPad T470 et fonctionne sous le système d'exploitation Windows 10 Professionnel.

4.2.2 Présentation du langage MATLAB

MATLAB représente une plateforme de programmation spécialement élaborée pour les ingénieurs et les scientifiques, leur permettant d'analyser et de concevoir des systèmes et des produits qui ont un impact sur notre monde. Le terme "MATLAB" est dérivé de "matrix laboratory". Contrairement à d'autres langages de programmation qui manipulent généralement des nombres un par un, MATLAB fonctionne sur des matrices et des tableaux entiers. Les concepts fondamentaux de ce langage incluent des opérations élémentaires telles que la création de variables, l'indexation de tableaux, les calculs arithmétiques et les différents types de données. De plus, MATLAB offre un moteur symbolique pour le calcul symbolique ainsi que "Simulink" pour la simulation graphique multidomaine et la conception basée sur des modèles. Avec une base d'utilisateurs de plus de quatre millions dans le monde, MATLAB est largement utilisé dans les domaines de l'ingénierie, des sciences et de l'économie. De nombreuses institutions académiques intègrent son utilisation dans leurs programmes d'enseignement et de recherche [39].

4.2.2.1 Fonctionnalités du langage Matlab

MATLAB offre plusieurs fonctionnalités utiles pour la simulation des RCSF, notamment :

1. Capacités de traitement des signaux et de traitement du signal numérique pour l'analyse des données de capteurs.
2. Offrant la possibilité de paralléliser les calculs, cela se traduit par une accélération significative du temps de calcul lors de la simulation de volumes importants de données pour les RCSF.
3. Effectuez la simulation et l'analyse de systèmes dynamiques complexes, incluant les systèmes de contrôle et de navigation destinés aux RCSF.
4. Il est conçu spécifiquement pour effectuer des calculs matriciels, essentiels pour simuler la propagation des ondes et l'interférence dans les RCSF.
5. Propose des outils puissants pour visualiser les résultats de simulation, tels que la création de graphiques et de cartes.

4.2.2.2 Boîtes à outils (toolbox) MATLAB pour la simulation des RCSF

Les boîtes à outils MATLAB représentent un ensemble précieux de ressources logicielles permettant de réaliser une multitude de tâches dans divers domaines d'ingénierie et de science. Parmi ces boîtes à outils, celles dédiées à la simulation des RCSF offrent une panoplie d'outils essentiels pour modéliser et analyser ces systèmes complexes.

1. **Simulink** : Un composant de MATLAB constitue une plateforme efficace pour concevoir des modèles complexes, ouvrant ainsi la voie à des simulations avancées des systèmes de communication numérique [40].
2. **Sensor Network Toolbox** : Cette boîte à outils facilite la gestion d'importants volumes de données de séries chronologiques provenant des capteurs. Elle permet l'annotation automatique, les étapes de traitement des données, et garantit l'intégrité des sources de données [41].
3. **Communications System Toolbox** : La boîte à outils Système de communications de MATLAB permet la synthèse et l'analyse des systèmes linéaires discrets invariants dans le temps dans le domaine des communications, en affichant les réponses impulsionnelles, fréquentielles et les graphiques pôles-zéros [42].

4. **MATLAB Plotting Toolbox** : La boîte à outils de tracé MATLAB aide à créer des graphiques linéaires, à barres, circulaires, surfaciques, en maillage, et animés dans MATLAB [43].

4.2.3 Métriques d'évaluation

Les métriques mentionnées sont essentielles pour évaluer l'efficacité et les performances des RCSF. L'analyse de ces indicateurs facilite une évaluation approfondie des performances et oriente les choix visant à améliorer ces réseaux.

1. **Durée de vie du réseau** : La période jusqu'à l'épuisement de l'énergie du premier nœud, indiquant le temps opérationnel total du réseau.
2. **Efficacité énergétique** : Le rapport entre les données réussies livrées au nœud puits et l'énergie totale consommée par le réseau.
3. **Taux de réussite de livraison de paquets (PDR)** : Cette métrique est cruciale dans ce contexte. Le PDR est calculé en prenant le ratio du nombre de paquets réellement reçus sur le nombre total de paquets envoyés, exprimé en pourcentage en utilisant l'équation suivante :

$$\text{PDR (\%)} = \left(\frac{\text{Nombre de Paquets Reçus}}{\text{Nombre de Paquets Envoyés}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

4. **Surcharge de clustering** : Le nombre total de messages de contrôle reçus par les nœuds individuels au sein du réseau pendant la procédure de clustering.

4.3 Évaluation des Performances

Dans cette section, nous avons simulé et évalué les performances de notre approche A-EE-WCA, en utilisant le simulateur MATLAB¹. L'objectif était d'évaluer les performances de notre approche dans un contexte donné. Les simulations ont été réalisées en utilisant les paramètres suivants : une zone de 1000 × 1000 m contenant 100 nœuds et une seule BS (sink node). De plus, chaque nœud avait une énergie initiale variant de 2 joules, avec une capacité de tampon de 100. La durée totale de la simulation était de 200 secondes. Les détails des paramètres de simulation sont récapitulés dans le Tableau

1. MATLAB, disponible sur <https://fr.mathworks.com/products/matlab.html>

4.1. Les positions des nœuds ont été sélectionnées de manière aléatoire, comme illustré dans la Figure 4.1, tandis que la BS ou sink node a été positionnée au centre de la zone de simulation afin d'assurer une bonne couverture. Nous avons comparé les résultats de notre approche proposée à ceux de l'algorithme EE-WCA [31], amélioré par notre méthode.

Paramètre	Valeur
Zone de Simulation	1000 × 1000 m
Temps de simulation	200 s
Nombre de nœuds	100
Énergie initiale	2 J
Capacité du tampon	100
Taille du paquet	512 bytes
Type de trafic	CBR
Protocole de routage	DSDV
Schéma de flux de données	Random Data
Accès au médium	BN-MAC
Coefficients α , β et γ	0.5, 0.2 et 0.3

TABLE 4.1 – Paramètres de Simulation.

4.3.1 Choix des coefficients

Dans le chapitre précédent, une méthode d'élection des CH basée sur le poids a été proposée. Des simulations ont été menées pour évaluer différentes valeurs de α , β et γ . Parmi ces valeurs, E_{RR} a été identifiée comme la mesure la plus critique, se voyant attribuer un coefficient élevé de 0,5. Les mesures de la LT_R et de la D_R ont été considérées comme moins cruciales, recevant ainsi des coefficients plus bas de 0,3 et 0,2 respectivement.

4.3.2 Résultats et Analyses

Dans la Figure 4.2, nous présentons l'état final des clusters obtenus après l'exécution de l'algorithme de sélection de cluster. Chaque cluster est représenté par une couleur distincte, avec le CH identifié par un symbole spécial et les membres du cluster représentés par des points.

Les clusters sont bien définis et répartis de manière équilibrée dans la zone de simulation, avec chaque CH positionné au centre de son groupe de membres. La distri-

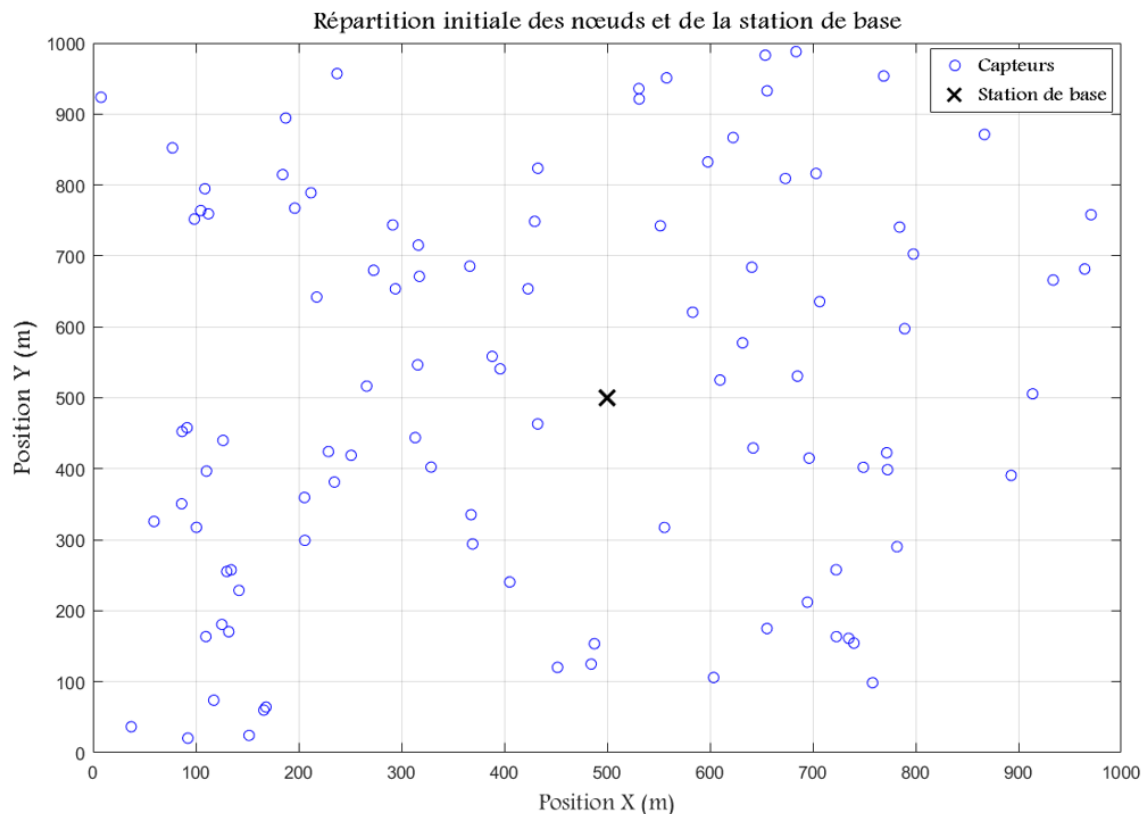


FIGURE 4.1 – Répartition des nœuds et de la BS.

bution spatiale des clusters reflète une couverture homogène de la zone de simulation, indiquant une gestion efficace de l'énergie et une optimisation de la connectivité du réseau.

En examinant de plus près les membres de chaque cluster, nous constatons que les nœuds sont regroupés de manière cohérente en fonction de leur proximité spatiale, confirmant ainsi l'efficacité de notre algorithme de sélection de cluster.

Ces résultats visuels valident l'efficacité de notre approche A-EE-WCA , qui sera complétée par des évaluations quantitatives dans la section suivante.

4.3.2.1 Durée de Vie du Réseau

La Figure 4.3 illustre l'évolution du nombre de nœuds actifs pour les protocoles EE-WCA et A-EE-WCA en fonction du temps. Initialement, A-EE-WCA montre une stabilité tandis qu'une légère baisse est observée pour EE-WCA, suggérant une phase de stabilisation. Après le 50ème instant (seconde), les deux courbes diminuent, mais EE-WCA décroît plus rapidement, indiquant une perte de longévité du réseau plus rapide. En revanche, A-EE-WCA présente une décroissance plus modérée, suggérant

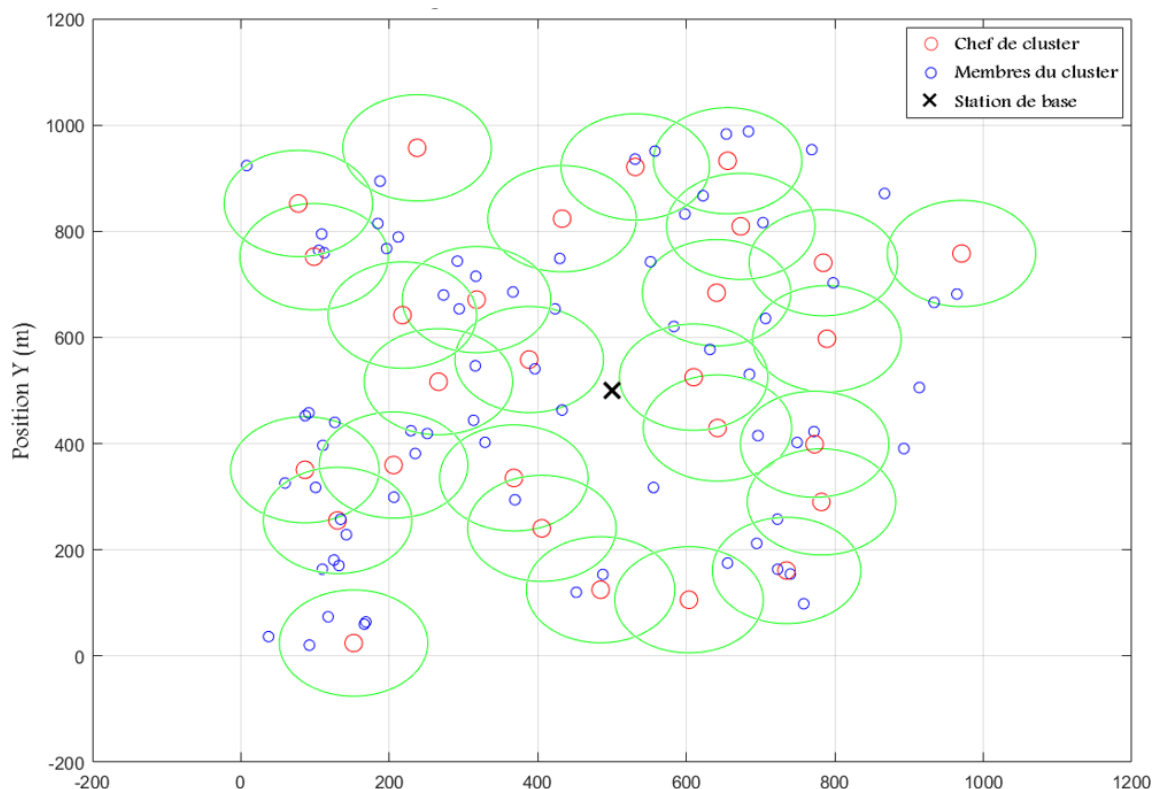


FIGURE 4.2 – État final des clusters avec les CH et leurs CM.

une amélioration potentielle de la longévité du réseau. Ainsi, A-EE-WCA se démarque par sa stabilité et son efficacité supérieure dans le maintien d'un grand nombre de nœuds actifs comparé à EE-WCA, avec un taux d'amélioration de 9.15 %.

4.3.2.2 Efficacité énergétique

La Figure 4.4 présente une comparaison entre l'algorithme A-EE-WCA et EE-WCA en termes de consommation totale d'énergie en fonction du temps. Initialement, les deux courbes montrent une augmentation de la consommation d'énergie similaire. Cependant, à partir de l'instant 100, on observe une croissance plus lente ou plus modérée pour A-EE-WCA par rapport à EE-WCA. Ces résultats suggèrent une efficacité à long terme de A-EE-WCA et une amélioration de 14.25 %.

4.3.2.3 Taux de réussite de livraison de paquets (PDR)

La Figure 4.5 présente PDR pour les algorithmes A-EE-WCA et EE-WCA en fonction du nombre de capteurs, allant de 0 à 200 par incréments de 40. Initialement, les deux algorithmes montrent une augmentation de leur taux, A-EE-WCA atteignant

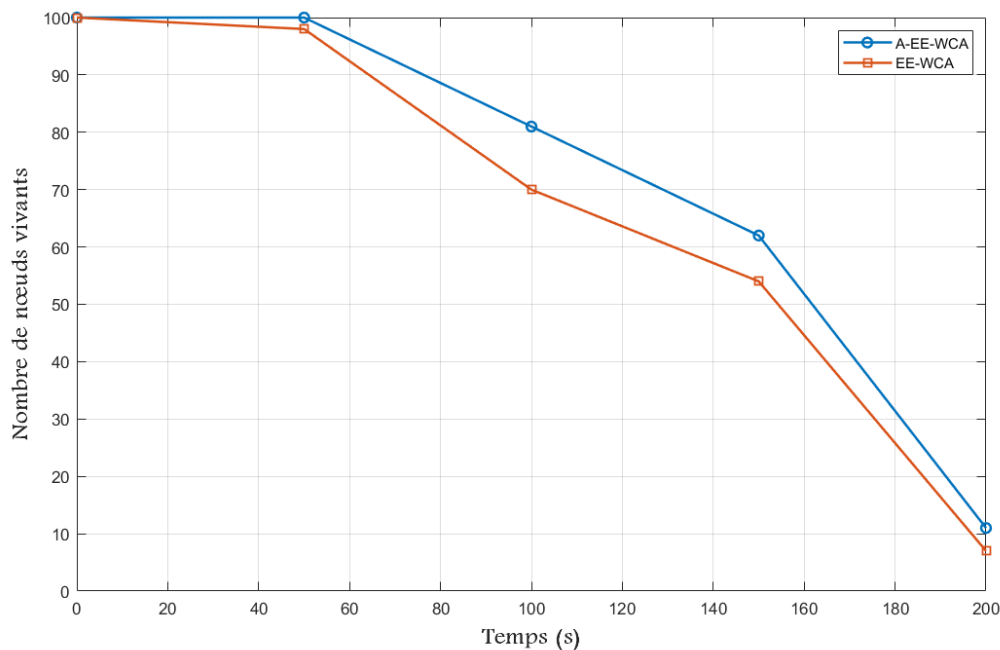


FIGURE 4.3 – Durée de vie du réseau.

65 % et EE-WCA atteignant 55 % jusqu'à 40 nœuds. Par la suite, l'augmentation devient presque constante, avec A-EE-WCA conservant un avantage. L'approche A-EE-WCA se démarque, affichant un taux de réussite 10.45 % plus élevé que celui d'EE-WCA, démontrant ainsi sa capacité à livrer la majorité des paquets et à améliorer les performances globales du réseau en termes de fiabilité et de solidité.

4.3.2.4 Surcharge de clustering

La Figure 4.6 montre la surcharge de clustering (Kbps) pour notre approche A-EE-WCA par rapport à l'approche EE-WCA à différentes vitesses pour le nombre de capteurs allant de 0 à 200. Nous remarquons une augmentation variée de la charge pour les deux approches, où A-EE-WCA génère une charge inférieure à celle de EE-WCA. Cela indique que notre méthode améliore l'utilisation des ressources et réduit les transferts non nécessaires de 15.35 %, garantissant ainsi une gestion plus efficace du réseau et une réduction des coûts de communication.

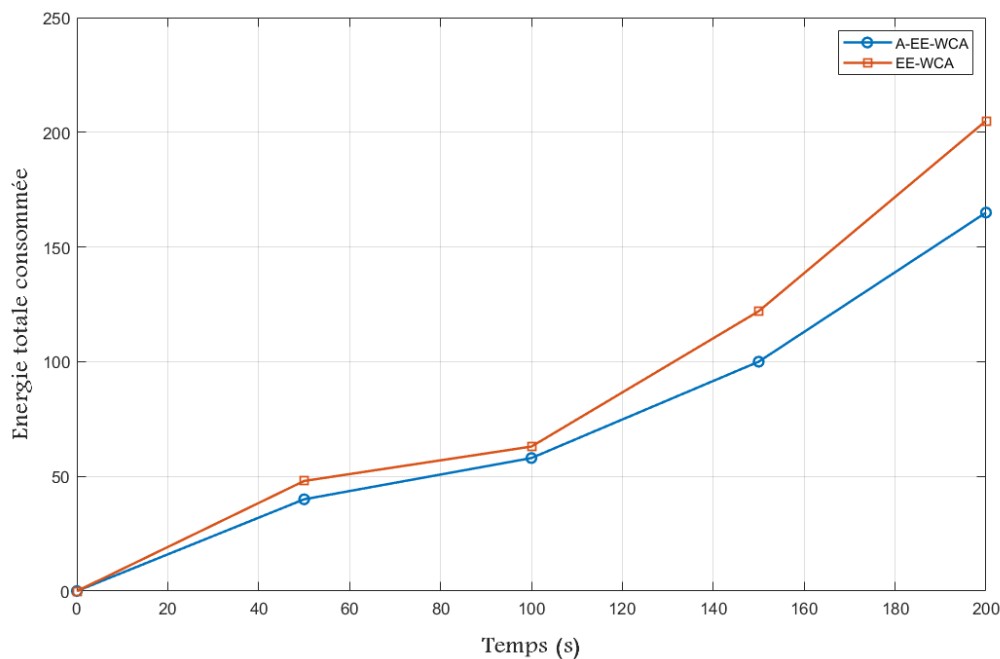


FIGURE 4.4 – Efficacité énergétique.

4.4 Discussion & Directions Futures

Bien que les approches de clustering des RCSF proposées soient puissent fournir des performances acceptables, nous envisageons d’explorer d’autres domaines importants dans la recherche et les applications des approches de clustering des RCSF. Voici un résumé de nos projets futurs :

- Adapter notre algorithme de clustering à divers environnements, comme les zones urbaines ou marines, en élaborant des stratégies spécifiques prenant en compte des caractéristiques uniques telles que la densité des nœuds, la mobilité et les interférences.
- Accorder une attention particulière à la sécurité et à la confidentialité des données dans les RCSF en développant des mécanismes de cryptage, d’authentification et de détection d’intrusion pour garantir l’intégrité et la protection des informations sensibles transmises sur le réseau.
- Conduire des expériences et des tests expérimentaux dans des environnements réels pour évaluer la performance et l’efficacité des méthodes de clustering, en recueillant des données empiriques et en comprenant mieux les défis pratiques rencontrés sur le terrain.

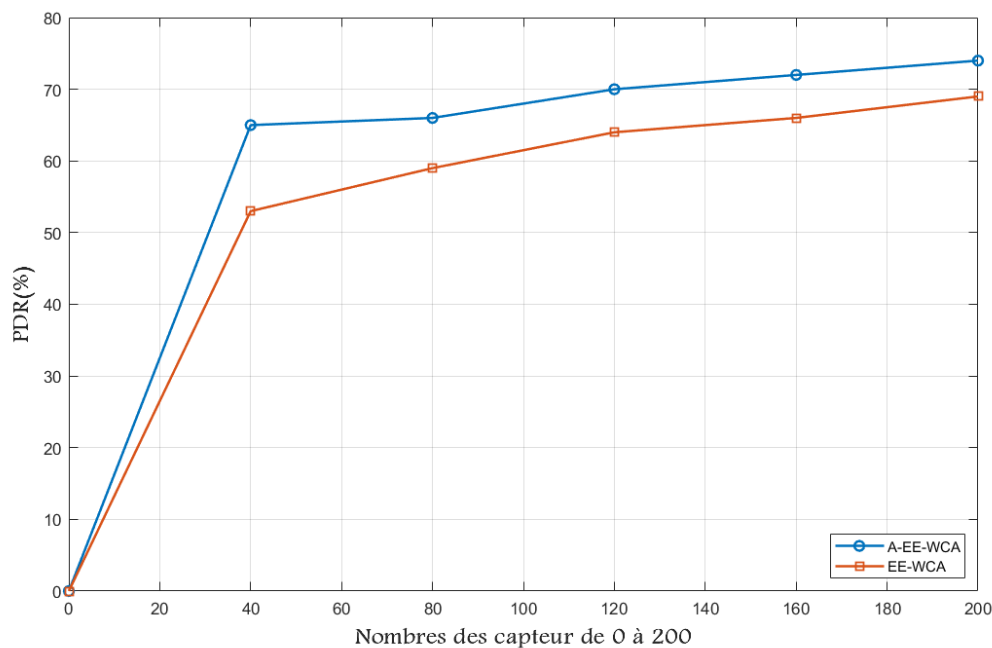


FIGURE 4.5 – Taux de réussite de livraison de paquets (PDR).

Notre objectif est d'améliorer les RCSF afin de créer de nouvelles opportunités pour des applications innovantes et bénéfiques dans des domaines comme l'environnement, la santé et la surveillance intelligente.

4.5 Conclusion

Cette étude met en avant l'importance cruciale des simulateurs, du choix méticuleux des métriques d'évaluation et de l'analyse comparative des performances des protocoles dans le processus de conception, de développement et d'optimisation des réseaux de communication. Grâce à MATLAB, nous avons pu modéliser et évaluer divers scénarios de réseau, tester différents protocoles de communication et analyser les performances du réseau. Grâce à la sélection judicieuse des métriques d'évaluation telles que la durée de vie du réseau, l'efficacité énergétique et le PDR, elle fournit un cadre solide pour l'analyse des RCSF dans différents scénarios. Cette analyse comparative nous a permis d'identifier les forces et les faiblesses des protocoles, fournissant des informations essentielles pour optimiser la conception des réseaux. En conclusion, l'utilisation de simulateurs et l'analyse comparative des performances des protocoles sont cruciales pour faire progresser les réseaux de communication et relever les défis de

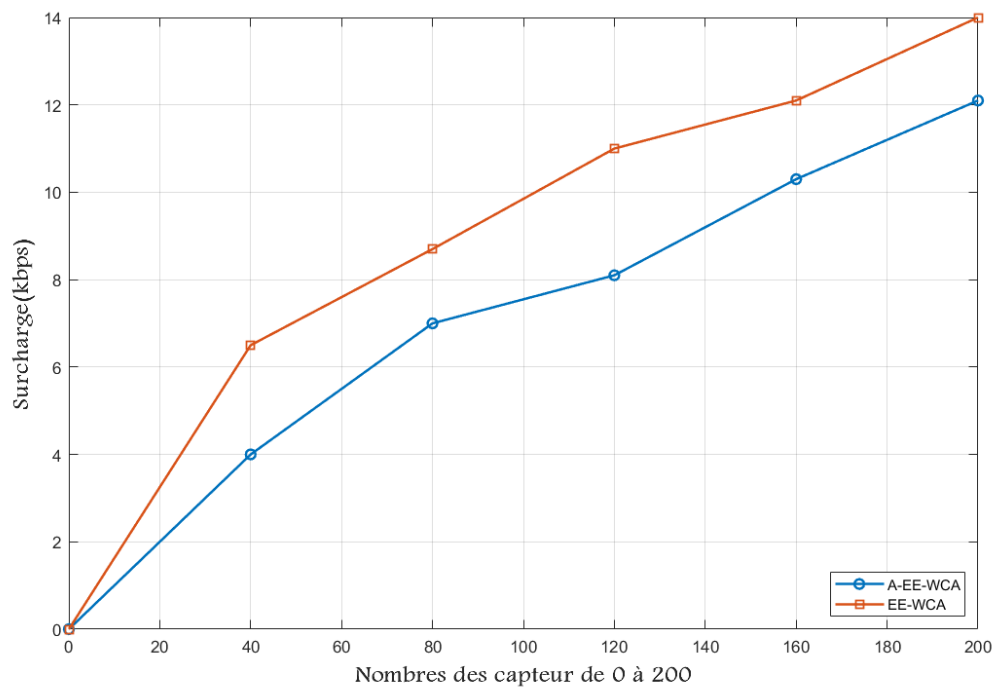


FIGURE 4.6 – Surcharge de clustering.

connectivité actuels et futurs.

Conclusion Générale

Dans le contexte actuel de la révolution numérique, l'Internet des Objets (IoT) occupe une position centrale dans les échanges de données. Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) se démarquent comme des infrastructures clés, collectant et transmettant des flux massifs de données en temps réel. Malgré ses atouts, l'IoT est confronté à des défis et des limites, nécessitant ainsi une exploration de solutions novatrices.

Notre projet a débuté par une analyse approfondie des RCSF, soulignant leur importance dans le domaine de l'IoT et leurs multiples applications. Nous avons ensuite scruté en détail la littérature portant sur les algorithmes de clustering associés aux RCSF de l'IoT. Dans cette optique, nous avons élaboré une nouvelle classification de ces algorithmes, fournissant une description exhaustive de chacun et abordant leurs contraintes principales.

Notre approche de clustering pour les RCSF, baptisée A-EE-WCA, s'attache à optimiser les performances et la scalabilité du réseau, en comparaison avec l'approche antérieure, EE-WCA. Notre projet s'articule autour de la création d'un processus efficace pour la sélection des Chefs de Cluster (CH), fondé sur trois critères fondamentaux : la capacité tampon, l'énergie disponible et la mobilité des nœuds.

Notre objectif suivant est de mettre en place une stratégie de formation de clusters visant à structurer les nœuds du réseau en groupes homogènes, afin de favoriser une meilleure communication et coordination entre eux. Nous avons clarifié nos hypothèses et objectifs, détaillé le fonctionnement de notre approche avec les types de nœuds utilisés et le déroulement de l'algorithme, étayé par un exemple concret.

En outre, nous avons réalisé une analyse de la complexité des messages et de la charge de communication, ainsi qu'une évaluation des propriétés d'agrégation. Par le biais d'une simulation approfondie avec MATLAB, nous avons évalué notre approche

A-EE-WCA, démontrant une nette amélioration par rapport à l'algorithme précédent.

En somme, notre mémoire contribue significativement à l'avancement des RCSF dans l'IoT, ouvrant la voie à des innovations et des solutions plus efficaces pour répondre aux besoins grandissants en matière de communication et de gestion des données.

Bibliographie

- [1] M. Nasser and A. Bakhouya, “Optimisation de la consommation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil,” mémoire de master, Université Ahmed Draia - Adrar, 2021.
- [2] N. BEN ABDELKARIM and A. ABDAD, “L’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil,” mémoire de fin d’étude master, Université Ahmed Draia - Adrar, 2022.
- [3] N. Agred and K. Rabia, “Simulation de la surveillance des réseaux de capteurs sans fil (rscf) sous omnet++,” Master’s thesis, Université Ibn Khaldoun - Tiaret, 2019.
- [4] A. Moussaoui, *Réseaux de Communication*. Bordj Bou Arreridj : Ali Moussaoui, 2017.
- [5] S. Hammoudi, *Les Réseaux de Capteurs sans Fil dans l’Internet des Objets*. PhD thesis, Université Ferhat Abbas Sétif, Faculté des Sciences, Département d’Informatique, 2019.
- [6] T. B. Mohammed, *Contribution aux Réseaux Sans Fil : Routage à base de l’algorithme MCL pour les Réseaux de Capteurs*. PhD thesis, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2021.
- [7] Y. REZKI and S. BOURDJAH, “Etude des mécanismes de localisation dans les réseaux de capteurs sans fil,” mémoire de master, Université A/Mira de Béjaia, 2014.
- [8] B. Mustapha, *Localisation des noeuds dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Montréal, 2007.
- [9] I. Akyildiz, S. WY, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks : A survey,” *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393–422, 03 2002.

- [10] M. LARRAS and D. KHALFOUNI, “Défis de sécurité de l’internet des objets problèmes et solutions,” mémoire de master, Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou, 2019.
- [11] N. BELHADJ and A. ABBAD, “La sécurité de l’internet des objets (iot),” mémoire de master, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2022.
- [12] A. M. K. Abdulzahra, A. K. M. Al-Qurabat, and S. A. Abdulzahra, “Optimizing energy consumption in wsn-based iot using unequal clustering and sleep scheduling methods,” *Internet of Things*, vol. 22, p. 100765, 2023.
- [13] C. E. MENHANE and A. ABDELOUAHAB, “Réseaux de capteurs sans fil : Mesure de l’efficacité énergétique des techniques de clustering,” mémoire de master, Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel, 2019.
- [14] R. Kumar and U. Kumar, “A hierarchal cluster framework for wireless sensor network,” in *2012 International Conference on Advances in Computing and Communications*, pp. 46–50, 2012.
- [15] R. Gupta, “Cluster head election in wireless sensor network : A comprehensive study and future directions,” *Int. J. Comput. Networks Appl*, vol. 7, pp. 178–192, 2020.
- [16] B. Guizani, *algorithmes de clustérisation et routage dans les réseaux Ad Hoc*. Theses, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard ; Université de la Manouba (Tunisie), Apr. 2012.
- [17] G. Mounia and H. Assia, “Améliorer les performances des rcsfs à l’aide de protocole de routage basé sur le clustering,” mémoire de master, Université de Ghardaia, 2020.
- [18] G. J. Abhay Patil, “A novel approach to stable cluster head selection with respect to energy and distance,” *Journal of Harbin Engineering University*, vol. 44, pp. 677–685, 2023.
- [19] H. Z. Qian Liao, “An energy balanced clustering algorithm based on leach protocol,” *School of Information Engineering, Zhengzhou Univesity, Zhengzhou, China*, pp. 0072–0077, 2013.

- [20] P. Deka and U. Saha, "Introduction of k-means clustering into random cascade model for disaggregation of rainfall from daily to 1-hour resolution with improved preservation of extreme rainfall," *Journal of Hydrology*, vol. 620, p. 129478, 2023.
- [21] S. Sree Nidhi, K. Kumar, and D. Sridharan, "Uniform and randomly distributed fuzzy logic based clustering in wireless sensor networks," in *2023 12th International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*, pp. 1–6, 2023.
- [22] X. Luo, C. Zhang, and L. Bai, "A fixed clustering protocol based on random relay strategy for ehwsn," *Digital Communications and Networks*, vol. 9, no. 1, pp. 90–100, 2023.
- [23] W. OUDALI and A. SALAHI, "Un protocole de clustering basé sur l'algorithme firefly amélioré pour le réseau de capteurs sans fil," mémoire de master, Université Ahmed Draia – Adrar, 2023.
- [24] A. Khalifeh, H. Abid, and K. A. Darabkh, "Optimal cluster head positioning algorithm for wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 20, no. 13, 2020.
- [25] Y. Q. Luyao Li and J. Xu, "A k-means clustered routing algorithm with location and energy awareness for underwater wireless sensor networks," *Photonics*, vol. 9, 2022.
- [26] A. Sun, K. Zhu, J. Du, and H. Cao, "Pso-based k-means algorithm for clustering routing in 5g wsn networks," in *2021 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1–6, 2021.
- [27] S. Randhawa and S. Jain, "Cross-layer energy based clustering technique for heterogeneous wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 114, pp. 1207–1233, Sept. 2020.
- [28] N. Kumar, P. Rani, V. Kumar, P. K. Verma, and D. Koundal, "Teeech : Three-tier extended energy efficient clustering hierarchy protocol for heterogeneous wireless sensor network," *Expert Systems with Applications*, vol. 216, p. 119448, 2023.
- [29] R. Sharma, N. Mittal, and B. S. Sohi, "Flower pollination algorithm-based energy-efficient stable clustering approach for wsns," *International Journal of Communication Systems*, vol. e4337, 2020.
- [30] A. A. Jasim, M. Y. I. Idris, S. Razalli Bin Azzuhri, N. R. Issa, M. T. Rahman, and M. F. b. Khyasudeen, "Energy-efficient wireless sensor network with an unequal

- clustering protocol based on a balanced energy method (eeucb),” *Sensors*, vol. 21, no. 3, 2021.
- [31] P. Gulganwa and S. Jain, “Ee-wca : Energy efficient weighted clustering algorithm to regulate application’s quality of service requirements,” *Wireless Personal Communications*, vol. 124, pp. 3647–3660, 2022.
- [32] H. Wang, S. A. Ali, M. Sarfraz, S. A. Ghauri, A. Mahmood, S. Basir, T. M. Kebedew, and S. Alam, “[retracted] a weighted cluster head selection algorithm for energy efficient wireless sensor networks,” *Journal of Sensors*, vol. 2022, p. 3055178, 2022.
- [33] T. Siron Anita Susan, B. Nithya, H. Agrawal, and D. Vijitendra, “K-weighted cluster head selection in wireless sensor networks,” in *Computer Communication, Networking and IoT* (S. C. Satapathy, J. C.-W. Lin, L. K. Wee, V. Bhateja, and T. M. Rajesh, eds.), (Singapore), pp. 33–43, Springer Nature Singapore, 2023.
- [34] E. Farahmand and A. Mahani, “A novel energy-efficient weighted multi-level clustering protocol,” *Journal of Applied Research in Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 69–78, 2022.
- [35] M. B. BENMAHDI, *Routage Intelligent dans les réseaux de capteurs à grande échelle*. PhD thesis, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEM, 2020.
- [36] Z. Qu and B. Li, “An energy-efficient clustering method for target tracking based on tracking anchors in wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 22, no. 15, 2022.
- [37] R. Dass, M. Narayanan, G. Ananthkrishnan, T. Kathirvel Murugan, M. K. Nallakuruppan, S. R. K. Somayaji, K. Arputharaj, S. B. Khan, and A. Almusharraf, “A cluster-based energy-efficient secure optimal path-routing protocol for wireless body-area sensor networks,” *Sensors*, vol. 23, no. 14, 2023.
- [38] Y. A. S. A. O. I. K. Prakash Mohan, Neelakandan Subramani and S. Ulaganathan, “Improved metaheuristics-based clustering with multihop routing protocol for underwater wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 22, 2022.
- [39] “The MathWorks, Inc.,” 1994–2024. <https://www.mathworks.com/>.
- [40] A. Giordano and A. Levesque, “Getting started with simulink,” pp. 1–26, 2015.
- [41] D. James and A. Wixted, “Adat : A matlab toolbox for handling time series athlete performance data,” *Procedia Engineering*, vol. 13, pp. 451–456, 2011.

- [42] D. Denev and T. Tsankov, "Synthesis and analysis of linear, discrete and timeinvariant systems, used in the field of communications, using matlab and signal processing toolbox," *Journal Scientific and Applied Research*, 2022.
- [43] S. Eshkabilov, "Plots and data visualization," *Beginning MATLAB and Simulink*, 2019.