

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Borj Bou Arréridj
Faculté des Mathématiques et d'Informatique
Département d'Informatique



MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme
Master en Informatique
Spécialité : Réseaux & Multimédia

THÈME

Collection efficace des données par puits mobile dans un
réseau de capteurs sans fil

Présenté par :

Amina BEN ABDALLAH

Asma BEN CHABANE

Soutenu publiquement le : 19/06/2024

Devant le jury composé de :

Président : Dr. Boubakeur MOUSSAOUI

Examinatrice : Dr. Manel LAMRI

Encadrant : Dr. Nadjib BENAOUA

2023/2024

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

À toute ma famille Et mes sœurs Imen, Amina et Manel que Dieu les garde et les protège.

À mes nièces Riyadh et Célia.

À mon encadrant, qui m'a soutenu tout au long de ce projet, Dr. Nadjib BENAOUA.

Et À toutes mes amies.

À tous ceux que j'aime.

Asma BEN CHABANE

Dédicaces

Avant tout, je tiens à remercier celui qui nous a créé, protégé, aidé et qui nous a donné entre bien d'autres, la patience et le courage pour accomplir entre autres mon mémoire de Master dans les meilleures conditions en disant « Dieu Merci ».

À mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci beaucoup mes parents.

Je tiens particulièrement à remercier notre encadrant Dr . Nadjib BENAOUA. Professeur à la Faculté des Mathématiques et d'Informatique, pour son encadrement, sa disponibilité, les discussions constructives et pour ses encouragements durant la réalisation de ce mémoire.

À toute ma famille, mes chers frères et sœurs, et à tous ceux qui ont contribué de près ou loin pour que ce projet soit possible.

Et À toutes mes amies.

merci infiniment

Amina BEN ABDALLAH

Remerciement

Au commencement de ce mémoire, nous exprimons notre gratitude envers 'Allah', qui nous a soutenus et a été source de patience et de courage tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi que durant ces années d'études.

Nous exprimons également notre gratitude envers notre encadrant, Dr. Nadjib BENAOUA, pour sa direction rigoureuse de ce travail, sa disponibilité, ses conseils précieux, la confiance qu'il nous a témoignée, ainsi que son suivi attentif tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Nous adressons nos remerciements les plus chaleureux aux membres du jury pour leur temps et leur expertise qu'ils ont consacrés à l'évaluation de notre travail.

Nous aimerions également exprimer notre reconnaissance à nos collègues de Master 2 R&M et à tous les enseignants du département d'Informatique pour leur contribution à notre formation et pour l'environnement d'apprentissage enrichissant qu'ils ont créé.

Enfin, un merci sincère à nos familles, nos amis et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leur soutien et leur encouragement tout au long de notre travail.

Résumé

Ce présent travail se concentre sur l'utilisation d'un puits mobile pour améliorer la collecte de données dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Nous avons considéré des scénarios applicatifs avec une collection événementielle de données et un mouvement aléatoire du puits. Dans ce cas, le besoin à mettre en place une solution pour mettre à la disposition des nœuds capteurs, de manière continue, la position la plus à jour du puits, surgisse. Pour répondre à cette problématique, nous avons proposée une solution nommée EMSPU comme acronyme de «Efficient Mobile Sink Position Update Protocol». Cette solution répond aux différentes questions posées par la mise à jour de la position du puits et la collecte des données, à savoir : la détermination des nœuds du réseau devant maintenir en continue la position à jour du puits, la manière avec laquelle cette position doit être mise à jour tout en minimisant la charge de communication qui peut être causée par cette mise à jour et dernièrement, le processus de collection devant être suivi par chaque nœud capteur lorsqu'il veut émettre ses propres données vers le puits. Afin de valider notre solution, nous l'avons intégrée dans le simulateur NS-3 et comparée à une solution de référence. Diverses expérimentations ont été menées, produisant des résultats très positifs.

Mots-clés : RCSF, puits mobile, efficacité énergétique, durée de vie du réseau, NS-3.

Abstract

This work focuses on the use of a mobile sink to improve data collection in wireless sensor networks (WSN). We considered application scenarios involving event-driven data collection and random movement of the sink. In such cases, the need arises to implement a solution that continuously provides sensor nodes with the most up-to-date position of the sink. To address this issue, we proposed our own solution, named EMSPU, which stands for «Efficient Mobile Sink Position Update Protocol». This solution provides the necessary answers to various questions posed by updating the sink's position and data collection, specifically : determining which network nodes should continuously maintain the most recent position of the sink, the method for updating this position while minimizing the communication load caused by the update, and finally, the collection process each sensor node should follow when it wants to send its data to the sink. To validate our solution, we integrated it into the NS-3 simulator and compared it with the baseline solution. Various experiments were conducted, yielding very positive results.

Keywords : WSN, mobile sink, energy efficiency, network lifetime, NS-3.

ملخص

يركز هذا العمل على استخدام جامع متحرك لتحسين عملية جمع البيانات في شبكات الاستشعار اللاسلكية. لقد تناولنا سيناريوهات تطبيقية تتعلق بجمع البيانات الناتجة عن حدوث أحداث مختلفة، باعتبار حركة عشوائية للجامع. في هذا السياق، يجب إيجاد حل لتزويد أجهزة الاستشعار بآخر موقع للجامع بشكل مستمر. استجابةً لهذه المشكلة، قدمنا حلاً خاصاً بنا يجب على الأسئلة المختلفة المتعلقة بتحديث موقع الجامع وجمع البيانات، مثل: تحديد العقد في الشبكة التي يجب عليها الاحتفاظ بآخر موقع للجامع بشكل مستمر، وكيفية تحديث هذا الموقع مع تقليل العبء التواصلي الناتج عن هذا التحديث، وأخيراً، الإجراءات التي يجب أن تتبعها كل عقدة استشعار عندما ترغب في إرسال بياناتها إلى الجامع. للتحقق من صحة عملنا، قمنا بدمج حلنا في محاكي NS-3 ومقارنته مع حل مرجعي. تم إجراء تجارب متعددة وأظهرت نتائج إيجابية للغاية.

الكلمات الرئيسية: شبكات الاستشعار اللاسلكية، جامع متحرك، كفاءة الطاقة، عمر

الشبكة، NS-3.

Table des matières

Résumé	v
Abstract	vi
ملخص	vii
Liste des abréviations	xii
Liste des figures	xiv
Liste des tableaux	xv
1 Introduction générale	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique	2
1.3 Contributions	3
1.4 Méthodologie et résultats	4
1.5 Organisation	4
2 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	5
2.1 Introduction	5
2.2 Réseaux de capteurs sans fil	5
2.2.1 Définition	5
2.2.2 Qu'est-ce qu'un noeud capteur?	6
2.2.3 Architecture d'un nœud capteur	7
2.3 Les différents modes de communication	8
2.3.1 Communication événementielle	8

2.3.2	Communication périodique	8
2.3.3	Communication à la demande	9
2.4	Directives de conception	9
2.5	Diverses formes de consommation d'énergie par un nœud capteur	10
2.6	Les techniques de conservation énergétique	11
2.6.1	Duty-cycling pour l'économie d'énergie	12
2.6.1.1	Protocoles Sleep/Wake-up	12
2.6.1.2	Protocoles MAC pour le Duty-cycling	12
2.6.2	Approches orientées-données	13
2.6.2.1	Techniques de réduction des données	13
2.6.2.2	Méthodes d'acquisition de données économes en énergie	13
2.6.3	Mobilité	14
2.7	Stratégies de routage dans les RCSF	14
2.7.1	Protocoles de routage à plat	14
2.7.2	Protocoles de routage hiérarchiques	15
2.7.3	Routage basé sur la localisation	15
2.8	Exemples applicatifs	16
2.8.1	Applications médicales	16
2.8.2	Applications industrielles	16
2.8.3	Applications du trafic routier	17
2.8.4	Applications environnementales	17
2.8.5	Applications liées à la sécurité	17
2.9	Conclusion	18
3	Collection par puits mobile dans les RCSF	19
3.1	Introduction	19
3.2	Formes de mobilité dans un RCSF	19
3.2.1	Mobilité des nœuds capteurs	20
3.2.2	Mobilité de l'évènement	20
3.2.3	Mobilité des nœuds puits	20
3.3	Avantages de la mobilité dans un RCSF	21
3.4	Schémas basiques de mobilité du nœud puits	22
3.4.1	Modèle de mobilité aléatoire/Imprévisible	22

3.4.2	Modèle de mobilité prévisible /à Trajectoire fixe	22
3.4.3	Modèle de mobilité contrôlée	22
3.5	Défis liés à cette mobilité du nœud puits	23
3.6	Exemples de scénarios applicatifs	24
3.7	Travaux connexes	25
3.7.1	Travaux sélectionnés	25
3.7.2	Discussion	29
3.8	Conclusion	30
4	Contribution	31
4.1	Introduction	31
4.2	Modèle réseau	31
4.3	Aperçu de la solution proposée	33
4.4	Description détaillée de notre solution	33
4.4.1	Structures de données utilisées	34
4.4.2	Liste des messages utilisés	35
4.4.3	Étapes de notre solution	38
4.4.3.1	Construction de la grille	38
4.4.3.2	Élection du cluster-head	39
4.4.3.3	Sélection des nœuds responsables de la sauvegarde de la position du puits	40
4.4.3.4	Processus de dissémination et du maintien de la position courante du puits	40
4.4.3.5	Processus de collection de données	42
4.4.3.6	Processus de réélection des cluster-heads	42
4.5	Conclusion	44
5	Évaluation des performances	45
5.1	Introduction	45
5.2	Simulateur NS-3	45
5.3	Méthodologie de simulation	47
5.3.1	Protocole de comparaison	47
5.3.2	Modèle énergétique	47

5.3.3	Paramètres de simulation	48
5.3.4	Métriques de comparaison	49
5.4	Résultats et discussion	50
5.4.1	Énergie totale consommée	50
5.4.2	Durée de vie du réseau	52
5.4.3	Charge due aux messages de contrôle	52
5.4.4	Taux de livraison des données	53
5.5	Conclusion	54
6	Conclusion générale	55
6.1	Contributions	55
6.2	Critique du travail	55
6.3	Travaux futurs et perspectives	56
	Références	56

Liste des abréviations

CH cluster-head.

CSMA Code Division Multiple Access.

DVS Dynamique Voltage Scaling.

ECMRD Energy-Efficient Clustering with Mobile Sink and Rendezvous Nodes for Data Collection.

EDEDA Energy and Delay Efficient Data Acquisition.

EMSPU Efficient Mobile Sink Position Update Protocol.

GCH Grid Cell Head.

GPSR Greedy Perimeter Stateless Routing.

IdO Internet des Objets.

PPCM Predefined Path Constrained Mobility.

QBR A Query driven Backbone based Routing for Mobile Sink based Wireless Sensor Networks.

RCSF Réseaux de Capteurs Sans Fil.

TARA Trajectory Planning and Route Adjustment.

TDMA Time Division Multiple Access.

UAV Unmanned Aerial Vehicle.

UGV Unmanned Ground Vehicules.

UMV unmanned maritime vehicles.

VGDR A Virtual Grid-Based Dynamic Routes Adjustment Scheme for Mobile Sink-
Based Wireless Sensor Networks.

Liste des figures

2.1	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.	6
2.2	Exemples de noeuds capteurs concrets	7
2.3	Architecture d'un nœud capteur.	7
2.4	Les différents modes de communication.	9
2.5	Principales sources de consommation d'énergie d'un capteur avec une radio CC2500 et un micro contrôleur MSP430	11
3.1	Formes de mobilité dans un RCSF.	21
4.1	Organisation des nœuds capteurs à l'aide d'une grille 7×7	32
4.2	La sélection des nœuds responsables de la sauvegarde de la position courante du puits (les noeuds qui sont en couleur verte).	34
4.3	Faire correspondre chaque CH dans le réseau avec le CH central approprié de sauvegarde de position.	41
4.4	Processus de collection de données.	43
5.1	Instantanés de NetAnim présentant notre réseau simulé avec des nœuds verts comme chefs de cluster (CH), des nœuds bleus en tant que CH et aussi noeuds responsables de la sauvegarde de la position du puits, et des nœuds rouges comme membres du cluster.	50
5.2	Énergie totale consommée en fonction du nombre de noeuds capteurs.	51
5.3	Durée de vie du réseau jusqu'à ce que le premier nœud capteur ait totalement épuisé son énergie.	52
5.4	Nombre total de transmissions de messages de contrôle en fonction du nombre de noeuds capteurs.	53
5.5	Taux de livraison des données en fonction du nombre de noeuds capteurs.	54

Liste des tableaux

3.1	Résumé des protocoles de routage examinés.	26
4.1	Tableau des messages utilisés.	36
4.2	Différentes règles d'acheminement (voir figure (4.3)).	42
5.1	Paramètres de simulation.	49

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Contexte

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) jouent un rôle crucial dans le contexte de l'Internet des objets (IdO), en facilitant la collecte de données essentielles à partir de divers environnements. Ces réseaux sont composés de nœuds autonomes, équipés de capteurs, de capacités de traitement et de modules de communication sans fil. Ces nœuds, également appelés capteurs, sont déployés dans des zones géographiques spécifiques pour surveiller et mesurer des paramètres physiques tels que la température, l'humidité, et les vibrations. Les données collectées sont ensuite transmises à un point central, communément appelé «puits», qui agit comme une passerelle vers des destinations externes. Les RCSF ont une large gamme d'applications, telles que la surveillance environnementale, la santé, l'agriculture intelligente, l'industrie, la sécurité, et la gestion des catastrophes.

Les nœuds capteurs sont des systèmes embarqués caractérisés par des ressources généralement limitées, ce qui signifie qu'ils ne sont pas capables d'effectuer des calculs intensifs en raison de leurs contraintes de traitement et de stockage. De plus, la capacité de transmission de ces nœuds est limitée, et ils sont alimentés par des batteries, ce qui restreint leur durée de fonctionnement. Toutes ces limitations nécessitent le développement d'algorithmes, de méthodes et de protocoles adaptés aux caractéristiques particulières des nœuds capteurs sans fil, en particulier leurs ressources énergétiques limitées. De plus, il est impératif de maintenir un juste équilibre en ce qui concerne la consommation d'énergie des nœuds durant toute tâche de col-

lection de données ou autre, afin d'éviter la défaillance précoce de certains nœuds par rapport à d'autres. Une telle situation entraînerait en fin de compte la fragmentation du réseau, ce qui rendrait la communication impossible.

1.2 Problématique

La mise en œuvre d'une collecte de données par un puits mobile est une approche émergente qui peut considérablement contribuer à la préservation de l'énergie des nœuds capteurs par rapport à une collecte effectuée par un puits statique.

Dans ce travail, nous nous intéressons à des scénarios applicatifs impliquant le déplacement aléatoire du nœud puits, accompagné d'un mode de communication événementiel pour les nœuds capteurs. Nous abordons en particulier, le défi de la dissémination efficace et continue de la position la plus récente du puits en mouvement aléatoire dans un RCSF. L'objectif est de rendre cette information de localisation disponible pour les nœuds capteurs du réseau afin qu'ils puissent acheminer leurs données vers ce puits. Une approche initiale à ce problème serait d'inonder le réseau avec cette information à chaque déplacement du puits. Cependant, cette méthode cause une consommation énergétique accrue car elle implique la transmission de cette information à chaque nœud du réseau. Une autre solution consiste à désigner un ensemble de nœuds capteurs dans le réseau chargés de conserver et de mettre à jour la position actuelle du puits. Par conséquent, tout nœud capteur, à l'exception de ceux inclus dans ce dernier ensemble, devrait d'abord contacter l'un des nœuds responsables de la sauvegarde de la position du puits pour obtenir cette information. Une fois la position connue, le nœud capteur peut ensuite transmettre ses données vers le puits en utilisant, par exemple, un routage géographique.

Notre travail vise à résoudre cette problématique en répondant aux questions spécifiques suivantes :

- Comment choisir le groupe de nœuds qui seront chargés de sauvegarder la dernière position du puits ?
- Comment actualiser cette dernière position du puits sur ces nœuds ?
- Comment minimiser la charge, c'est-à-dire le nombre de messages, induit par la diffusion et la mise à jour continue de cette position ?
- Quelle procédure chaque nœud capteur doit-il suivre pour récupérer cette information

de localisation auprès des nœuds responsables de sa sauvegarde ?

1.3 Contributions

Pour relever ce défi, nous proposons dans ce projet une nouvelle approche que nous appelons EMSPU, acronyme de «Efficient Mobile Sink Position Update Protocol». Notre approche se décompose en plusieurs étapes. D'abord, nous suggérons de diviser le réseau en une grille carrée pour faciliter la gestion et la communication entre les nœuds. Cette grille est de taille $(K \times K)$, avec K obligatoirement impair. Ensuite, nous procédons à l'élection des chefs de cellules, appelés cluster-heads (CH), au sein des différentes cellules.

Une fois les CH élus, la prochaine étape consiste à sélectionner un sous-groupe de nœuds capteurs chargés d'enregistrer en permanence la position la plus récente du nœud puits. Pour cela, nous désignons les CH de la ligne et de la colonne centrales de la grille pour remplir ce rôle.

Nous proposons également un ensemble de règles d'acheminement pour transmettre chaque nouvelle position du puits à ces nœuds responsables de son maintien, et donc, pour mettre à jour cette position sur ces nœuds. Les mêmes règles sont utilisées pour acheminer les demandes de position des nœuds capteurs, souhaitant envoyer des données, aux CH responsables de la sauvegarde de la position. Ces CH répondent ensuite en renvoyant la position la plus récente aux nœuds capteurs demandeurs. Une fois cette information obtenue, les nœuds capteurs utilisent un routage géographique pour transmettre leurs données au puits.

Enfin, nous assurons la durabilité du réseau en réévaluant périodiquement l'éligibilité des CH actuels à assumer ce rôle, en vérifiant leur état énergétique. Cela permet d'éviter les défaillances précoces des nœuds et de maintenir un fonctionnement optimal du réseau à long terme. Cette approche garantit une gestion équilibrée de la consommation énergétique tout en assurant une dissémination rapide et fiable de la position du nœud puits au sein du RCSF, contribuant ainsi à son efficacité et à sa durabilité.

1.4 Méthodologie et résultats

Afin de valider l'efficacité de notre proposition, nous avons procédé par simulation à l'aide du simulateur NS-3. Nous avons en particulier, implémenté notre solution (EMSPU) ainsi qu'une solution de référence pour les comparer. Des expérimentations variées ont été réalisées pour obtenir les résultats nécessaires. Ces résultats se sont avérés extrêmement positifs, confirmant la capacité de notre proposition à atteindre les objectifs fixés et démontrant la supériorité de EMSPU par rapport à la solution de référence.

1.5 Organisation

Ce document est organisé en quatre chapitres principaux. Dans le premier chapitre, nous introduisons les concepts fondamentaux des réseaux de capteurs sans fil.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'exploration de l'approche de collecte de données par puits mobile, en examinant les travaux de recherche antérieurs pertinents.

Le troisième chapitre présente notre contribution personnelle, comprenant une solution innovante pour améliorer la collecte de données dans les RCSF à l'aide d'un puits mobile.

Enfin, le quatrième chapitre évalue et valide notre approche proposée à travers des simulations approfondies.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale récapitulant nos résultats.

Chapitre 2

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

2.1 Introduction

Ce chapitre introduit les notions essentielles des réseaux de capteurs sans fil (RCSF), composés de capteurs sans fil déployés dans une zone donnée, pour surveiller des paramètres environnementaux. Il présente l'architecture des nœuds capteurs, les modes de communication, les directives de conception, les enjeux liés à la consommation d'énergie, les stratégies de routage, et des exemples d'applications variées nous avons déjà présenté dans la section . Ce panorama complet établit les fondements, pour une meilleure appréhension du travail qui sera exposé dans le chapitre suivant.

2.2 Réseaux de capteurs sans fil

Cette partie expose les concepts d'un RCSF, d'un nœud capteur, ainsi que l'architecture qui définit ce dernier.

2.2.1 Définition

Un RCSF est constitué de centaines voire de milliers de capteurs, également nommés "nœuds" ou "nœuds"[1], fonctionnant à l'aide de piles ou batteries et répartis de manière aléa-

toire ou déterministe dans une zone géographique dénommée "zone de captage" ou "zone d'intérêt". Ces capteurs prélèvent des mesures pertinentes à leur environnement immédiat et utilisent des communications sans fil pour envoyer les données collectées à un nœud central puissant, désigné sous les termes "nœud puits" ou "station de base". Ce dernier est connecté à une machine par le biais d'Internet ou par satellite, facilitant ainsi l'accès des utilisateurs distants aux données recueillies. La figure 2.1 illustre l'architecture d'un RCSF [1, 2].

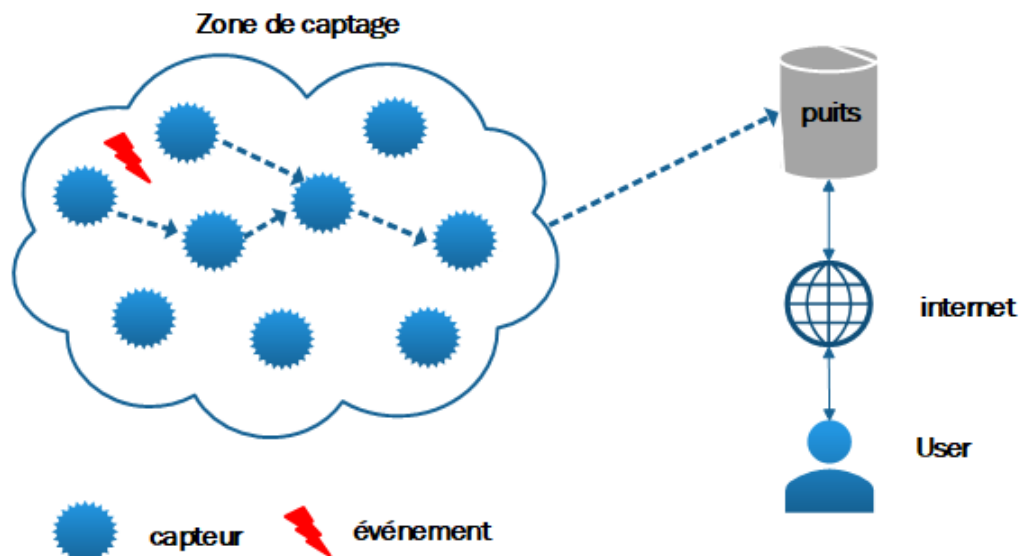


FIGURE 2.1 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.

2.2.2 Qu'est-ce qu'un nœud capteur ?

Un nœud capteur sans fil est un dispositif individuel au sein d'un RCSF. Il est équipé de capteurs pour mesurer des paramètres spécifiques de l'environnement, tels que la température, l'humidité, la lumière, la pression, etc. Ces nœuds capteurs sont généralement de petite taille, alimentés par des sources d'énergie, en particulier des batteries, et disposent de capacités de communication sans fil pour échanger des données avec d'autres nœuds du réseau. La figure 2.2 illustre des nœuds capteurs réels [2].

Les principales caractéristiques des nœuds capteurs dans un RCSF incluent :

- **La perception** : les nœuds capteurs sont équipés de capteurs spécifiques permettant de mesurer des grandeurs physiques ou chimiques dans l'environnement.
- **Communication sans fil** : ils utilisent des technologies sans fil, telles que le Wi-Fi, le Bluetooth ou d'autres protocoles personnalisés, pour transmettre des données aux

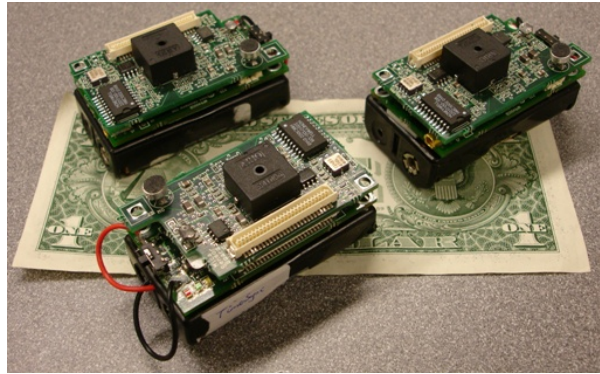


FIGURE 2.2 – Exemples de nœuds capteur concrets[2].

nœuds voisins ou à une station de base.

- **Alimentation** : ils sont généralement alimentés par des sources d'énergie restreintes, en particulier des batteries, ce qui nécessite une gestion efficace de la consommation d'énergie.
- **Traitement local** : certains nœuds capteurs peuvent effectuer un traitement local des données avant de les transmettre, ce qui contribue à réduire la charge du réseau.
- **Auto-organisation** : dans certains cas, les nœuds capteurs peuvent s'auto-organiser pour optimiser la couverture du réseau, ou s'adapter à des changements dans l'environnement.

2.2.3 Architecture d'un nœud capteur

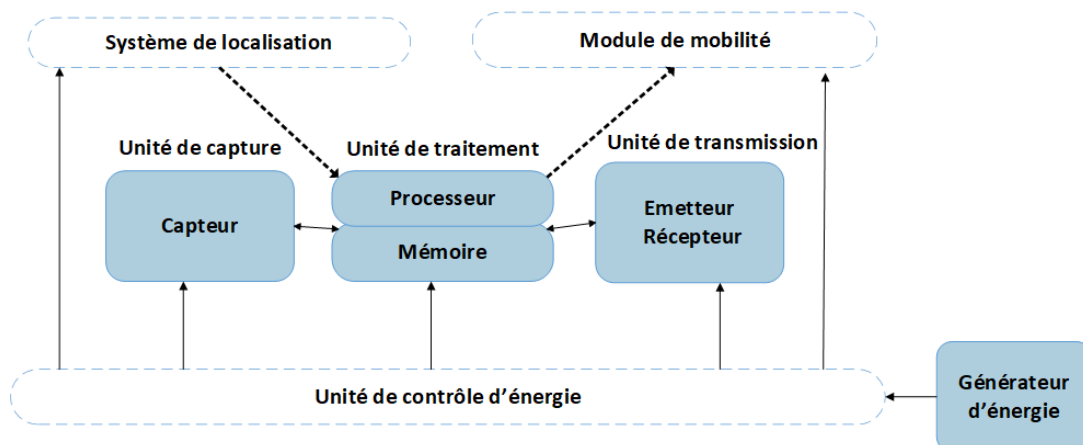


FIGURE 2.3 – Architecture d'un nœud capteur.

Un nœud capteur est équipé de plusieurs unités fonctionnelles qui lui permettent d'accomplir sa tâche principale. Comme représenté dans la figure 2.3, un nœud capteur se compose des quatre unités principales suivantes [1, 3] :

- **Unité de capture** : sa fonction consiste à convertir une mesure physique prélevée dans l'environnement, où elle est positionnée en une donnée numérique.
- **Unité de traitement** : il s'agit d'un microprocesseur doté de capacités de calcul limitées, et d'un espace de stockage restreint. Il est constitué de deux interfaces : une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Son rôle est de superviser les procédures qui permettent au nœud de collaborer, avec d'autres nœuds pour exécuter les tâches d'acquisition, et de stocker les données collectées.
- **Unité de transmission** : un module de transmission sans fil, caractérisé par une puissance radio limitée, ne dépasse pas une portée d'environ une centaine de mètres en extérieur et de quelques dizaines de mètres en intérieur.
- **Unité d'énergie** : une source d'alimentation limitée qui est partagée par toutes les unités précédemment décrites.

2.3 Les différents modes de communication

La communication dans un RCSF peut suivre trois modes distincts [4] : événementielle, périodique ou à la demande.

Les trois sections suivantes détaillent chacun de ces trois modes.

2.3.1 Communication événementielle

Dans ce mode opérationnel comme le montre la figure 2.4a, les capteurs transmettent des données au puits dès qu'ils détectent un événement spécifique. Prenons l'exemple d'une application de gestion des déchets et des conteneurs en verre. Lorsque les capteurs repèrent un dépassement du seuil de remplissage d'un conteneur, ils envoient immédiatement cet événement détecté au nœud puits. Ce dernier notifie alors les autorités de la commune afin d'organiser le passage d'un camion pour vider le conteneur.

2.3.2 Communication périodique

Le mode périodique se caractérise par l'envoi régulier d'informations environnementales des capteurs vers le nœud puits, comme illustré dans la figure 2.4b. Un exemple concret d'application dans le domaine agricole est la surveillance de l'état du sol. Dans cette configuration,

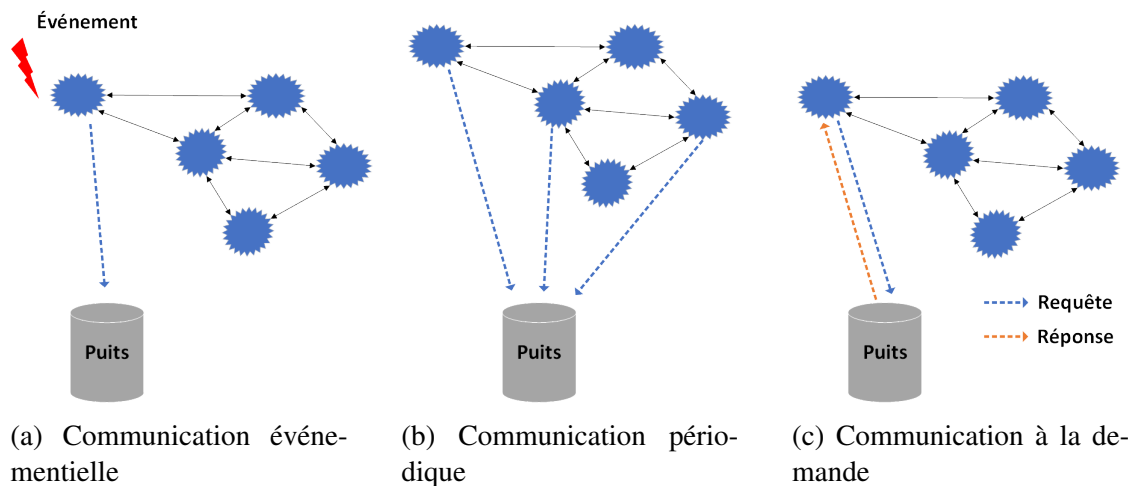


FIGURE 2.4 – Les différents modes de communication.

les capteurs sont déployés dans un champ et envoient à intervalles réguliers des données sur l'état du sol. Cette démarche vise à optimiser les apports en eau et en nutriments pour améliorer la gestion agricole.

2.3.3 Communication à la demande

En mode à la demande, le puits initie le processus en envoyant une requête à un ou plusieurs nœuds, leur demandant de lui transmettre des données, comme illustré dans la figure 2.4c. Un exemple concret de cette approche est la télé-relève des compteurs d'eau. Dans de telles applications, des capteurs sont déployés en association avec les compteurs d'eau pour surveiller la consommation des clients. Le nœud puits agit comme un technicien équipé d'un dispositif de collecte de données. Lorsqu'il se trouve devant un immeuble pour recueillir des informations, le technicien envoie une demande de collecte d'information via son nœud puits. Une fois que la demande est reçue par le ou les nœuds de destination, ceux-ci répondent en transmettant les informations requises au nœud puits.

2.4 Directives de conception

Toute solution envisagée pour les RCSF, qu'il s'agisse d'accès au canal sans fil, de routage ou autre, doit être principalement orientée par les deux directives suivantes[1] :

- Minimiser la consommation énergétique des nœuds capteurs, afin de prolonger la durée de vie du réseau.

- Maintenir un équilibre dans la consommation d'énergie des nœuds afin de maximiser la durée de vie du réseau.

Ces objectifs doivent être atteints, malgré les contraintes des nœuds capteurs, incluant des capacités limitées en calcul, stockage, communication, et des sources d'énergie restreintes .

2.5 Diverses formes de consommation d'énergie par un nœud capteur

Comme nous avons déjà présenté dans la section 2.2.3, un nœud capteur est alimenté par une batterie qui lui permet d'effectuer ses différentes tâches, en particulier, de perception, de traitement et de communication. Parmi ces trois fonctionnalités et comme le montre la figure 2.5, la radio est la source la plus consommatrice d'énergie.

En fait, la surconsommation d'énergie dans les RCSF peut provenir de diverses sources, tant du côté de la détection que de la communication. Voici un résumé des points essentiels relatifs aux sources de surconsommation d'énergie [5] :

- **Consommation inutile due à la gestion inadéquate de la détection** : Une gestion inefficace du dispositif de détection, telle qu'un contrôle inapproprié de la fréquence d'échantillonnage, peut provoquer une augmentation non nécessaire de la consommation d'énergie.
- **Surconsommation liée à la communication** : la couche liaison de données est particulièrement sujette à des phénomènes énergivores. Phénomènes recensés incluant :
 - **Écoute à vide (Idle Listening)** : Quand le nœud capteur est en veille, il demeure en mode d'écoute du canal, prêt à recevoir des données, ce qui entraîne une consommation d'énergie. Il est conseillé d'éteindre la radio lorsqu'elle n'est pas nécessaire pour la transmission de données, afin de réduire cette consommation d'énergie inutile.
 - **Collision** : la collision, qui se produit lorsque plusieurs paquets sont reçus simultanément, entraîne une surconsommation d'énergie due à la retransmission des paquets.
 - **Écoute abusive (Overhearing)** : lorsqu'un nœud capteur reçoit un paquet qui ne

lui est pas adressé, cela engendre une surconsommation d'énergie, surtout dans des réseaux denses soumis à une forte charge de trafic.

- **Overhead des paquets de contrôle** : les messages de contrôle indispensables pour la transmission de données entraînent une consommation d'énergie. Il est crucial de minimiser le nombre de paquets de contrôle, pour éviter une diminution significative du débit utile effectif.
- **Overmitting** : il s'agit des situations où un nœud envoie un paquet alors que sa destination n'est pas prête à le recevoir, ce qui conduit à une surconsommation d'énergie.

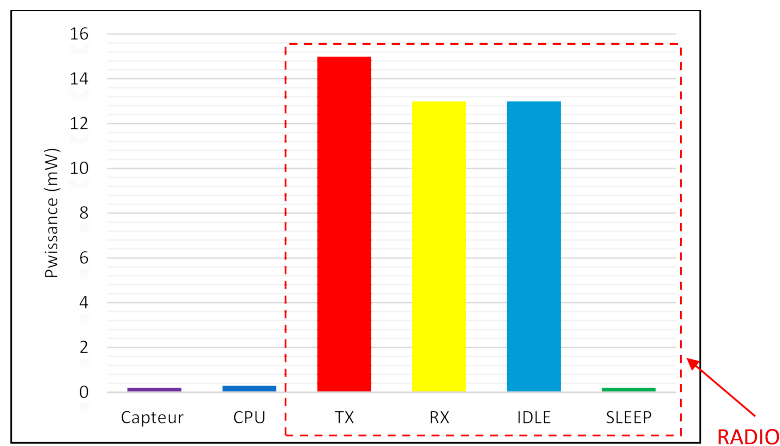


FIGURE 2.5 – Principales sources de consommation d'énergie d'un capteur avec une radio CC2500 et un micro contrôleur MSP430 [4]

2.6 Les techniques de conservation énergétique

L'étude des sources de dépenses énergétiques dans les RCSF révèle, comme nous avons déjà signalé préalablement, que la consommation énergétique d'un capteur provient principalement des opérations de détection, de traitement et de communication. Diverses approches visent à réduire cette consommation, agissant au niveau de la capture, du traitement ou de la communication. Trois classes de techniques de conservation d'énergie se dégagent : le Data cycling, les approches orientées données et la mobilité. Nous examinerons dans les sections suivantes chaque catégorie de techniques [5].

2.6.1 Duty-cycling pour l'économie d'énergie

Cette technique, principalement appliquée dans l'activité réseau, cherche à améliorer l'efficacité énergétique en mettant la radio de l'émetteur en mode sommeil lorsque la communication n'est pas nécessaire. Le Duty-cycling, qui représente la proportion de temps pendant laquelle les nœuds sont actifs, implique une alternance entre des périodes actives et des périodes de sommeil en fonction de l'activité du réseau. Pour synchroniser ces cycles, un algorithme d'ordonnement Sommeil/Réveil est utilisé, permettant aux nœuds voisins d'être actifs simultanément, favorisant ainsi l'échange de paquets même avec un faible duty-cycle. Voici un résumé des Protocoles essentiels aux sources de Duty-cycling :

2.6.1.1 Protocoles Sleep/Wake-up

Ces protocoles qui sont déployés soit au niveau de la couche réseau, soit au niveau de la couche application, définissent des régimes sleep/wake-up pour des composants spécifiques, tels que le module Radio. Ils se regroupent en trois catégories : à la demande, rendez-vous programmés, et régimes asynchrones. Les protocoles à la demande, intuitifs pour la gestion d'énergie, impliquent le réveil d'un nœud uniquement lorsqu'un autre souhaite communiquer. Cependant, ils nécessitent souvent l'utilisation de plusieurs radios pour gérer les compromis entre énergie et performances.

2.6.1.2 Protocoles MAC pour le Duty-cycling

Différentes catégories de protocoles MAC, sont utilisées pour implémenter le Duty-cycling , et gérer l'énergie dans les RCSFs :

Protocoles basés sur TDMA

Divisant le temps en trames et slots, ces protocoles attribuent des créneaux horaires à chaque nœud, permettant des économies d'énergie, bien que leur utilisation soit limitée en raison de problèmes de mise à l'échelle, de synchronisation et de sensibilité aux interférences.

Protocoles avec contention

Les plus répandus, ils assurent le duty cycling en intégrant étroitement les fonctions d'accès au canal avec une méthode de mise en sleep/wakeup, offrant robustesse et évolutivité malgré

une consommation d'énergie accrue.

Protocoles MAC hybrides

Alternant entre les approches (TDMA) et (CSMA) en fonction du niveau de contention, ces protocoles visent à combiner les avantages des deux méthodes pour compenser leurs faiblesses respectives.

2.6.2 Approches orientées-données

Les méthodes traditionnelles de duty cycling ne tiennent pas compte de la nature particulière des données transportées dans les réseaux de capteurs. Les approches axées sur les données peuvent présenter une solution plus économe en énergie et sont généralement regroupées en deux catégories principales [5] : les techniques de réduction des données et les méthodes d'acquisition de données économes en énergie.

2.6.2.1 Techniques de réduction des données

Cette classification inclut les approches de prédiction et d'agrégation des données. La première catégorie cherche à établir des modèles d'abstraction décrivant le phénomène surveillé. Ces modèles peuvent anticiper les valeurs détectées par les nœuds avec une certaine marge d'erreur, permettant ainsi l'évaluation des requêtes des utilisateurs au niveau du Sink sans nécessiter l'obtention précise des données des nœuds capteurs. La seconde catégorie concerne l'agrégation des données, tel que le calcul de moyennes à partir des nœuds intermédiaires entre le nœud source et le Sink.

2.6.2.2 Méthodes d'acquisition de données économes en énergie

Cette catégorie a pour objectif de minimiser la consommation d'énergie du module de détection, remettant en question l'idée selon laquelle la détection a une consommation d'énergie négligeable. Ces techniques se concentrent principalement sur la réduction du nombre d'acquisitions (échantillons de données) afin de diminuer la consommation énergétique du module de détection et, par conséquent, la consommation totale du réseau. Elles se déclinent en techniques d'échantillonnage adaptatif, hiérarchiques et actives, chacune exploitant des stratégies spécifiques pour réduire la quantité de données à acquérir, contribuant ainsi à une gestion plus

efficace de l'énergie dans RCSF.

2.6.3 Mobilité

Dans le cadre des réseaux de capteurs statiques, l'utilisation de la mobilité des nœuds se révèle essentielle pour corriger les disparités de consommation d'énergie. En l'absence de mobilité, les nœuds situés à proximité du Sink peuvent rapidement épuiser leurs batteries, même avec des stratégies de préservation d'énergie en place. L'introduction de nœuds collecteurs mobiles sous contrôle, constitue une solution en réduisant la longueur des chemins de transmission et en minimisant les charges de communication. Deux approches de mobilité sont identifiées, se basant sur la mobilité du Sink ou des nœuds relais. Le contrôle de la mobilité, qu'il soit préalablement défini ou aléatoire, revêt une importance capitale dans la conception du réseau. De plus, des méthodes telles que (DVS)(Dynamique Voltage Scaling) et le partitionnement de systèmes complètent cette approche en proposant des moyens adaptatifs pour économiser l'énergie nécessaire au traitement des capteurs. En résumé, l'intégration de la mobilité, notamment à travers l'utilisation de nœuds mobiles, se présente comme une solution efficace pour optimiser la consommation d'énergie dans les RCSF [5].

2.7 Stratégies de routage dans les RCSF

Comme nous l'avons déjà mentionné, les RCSF sont des réseaux de capteurs constitués de nœuds sans fil généralement déployés pour surveiller un environnement physique ou recueillir des données dans des applications telles que la surveillance environnementale, la surveillance industrielle, etc. Les stratégies de routage dans ces réseaux jouent un rôle crucial pour assurer la communication efficace des données entre les nœuds capteurs et la station de base ou le nœud collecteur.

Voici, dans ce qui suit, quelques-unes des stratégies de routage couramment utilisées dans les RCSF.

2.7.1 Protocoles de routage à plat

Dans ces schémas de routage, tous les nœuds du réseau jouent un rôle similaire et disposent des mêmes ressources. Lorsqu'un nœud souhaite transmettre des données à la station de base,

il lance une opération de recherche de chemins pour trouver une route valide, puis il achemine les données en utilisant le mode de transmission multi-sauts. Bien que la mise en œuvre de ces protocoles soit relativement simple par rapport à d'autres approches, elle entraîne cependant une consommation d'énergie élevée et un nombre important de messages de contrôle [6, 2, 1].

2.7.2 Protocoles de routage hiérarchiques

Les RCSF visent à optimiser l'efficacité énergétique pour prolonger leur durée de vie. Les protocoles de routage hiérarchiques sont privilégiés pour cette raison, organisant les nœuds en clusters avec des rôles spécifiques. Ce système comprend deux niveaux : la clusterisation, qui désigne des "CH" (Cluster Heads) et des nœuds membres, et le routage des données. Les nœuds membres transmettent leurs données au CH du cluster, qui les relaie à la station de base ou les agrège pour transmission. La clusterisation améliore la scalabilité et économise l'énergie. l'exemple type de ces protocoles est LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [6, 2, 1].

2.7.3 Routage basé sur la localisation

Les protocoles de routage conçus pour les réseaux de capteurs nécessitent des données de localisation pour estimer les distances entre les nœuds et gérer la consommation d'énergie. En l'absence de schéma d'adressage standard comme les adresses IP et en raison des déploiements spécifiques dans des zones spatiales, la localisation des nœuds est essentielle pour router les données de manière efficace. Par exemple, en délimitant une zone surveillée, les requêtes peuvent être limitées à cette région en utilisant les emplacements des capteurs, ce qui réduit le nombre de transmissions nécessaires.

Dans ces protocoles, les capteurs évaluent les distances avec leurs voisins en se basant sur la puissance du signal (RSSI) ou à l'aide de systèmes de positionnement global (GPS) pour obtenir les informations de localisation. Chaque nœud ajoute la station de base comme destination lors de l'envoi d'un paquet, puis les nœuds intermédiaires transmettent les paquets au voisin géographiquement le plus proche de la destination. Ce processus se répète jusqu'à ce que les paquets atteignent la station de base. Ce type de routage, tel que le (GPSR) (Greedy Perimeter Stateless Routing), ne requiert pas l'établissement ou la maintenance de chemins, ce qui permet d'économiser de l'énergie et de la bande passante, car aucune demande de route ou

de propagation d'état n'est nécessaire après un seul saut [6, 2] .

2.8 Exemples applicatifs

Les RCSF sont constitués de divers types de capteurs capables de surveiller et de contrôler une grande variété de paramètres environnementaux. Parmi ces paramètres, on compte la température, l'humidité, la pression, le niveau sonore, le mouvement d'objets et la composition des sols. Grâce au développement de la communication sans fil et à la miniaturisation des capteurs, ces réseaux peuvent s'étendre à de nombreux domaines d'application. Leur utilité s'avère particulièrement significative dans divers secteurs où ils apportent des contributions considérables.

Dans la suite, nous explorerons quelques exemples d'applications dans ces différents domaines pour illustrer les nombreuses utilisations des RCSF [2].

2.8.1 Applications médicales

La surveillance continue des patients est rendue possible grâce à l'utilisation de micro-capteurs, qui offrent la possibilité de recueillir des données physiologiques de haute qualité. Ces capteurs peuvent être ingérés ou implantés sous la peau, ce qui facilite le diagnostic précoce et précis de diverses maladies. Nous pouvons citer par exemple :

- Les micro-caméras ingérables, sans nécessité d'intervention chirurgicale, sont capables de transmettre des images de l'intérieur du corps humain une fois avalées.
- La conception d'une rétine artificielle contenant environ une centaine de micro-capteurs vise à améliorer la vision oculaire.

2.8.2 Applications industrielles

Dans l'industrie, on utilise des capteurs ou des actionneurs pour surveiller et contrôler les processus. Par exemple, dans une usine de traitement à plusieurs étapes, des capteurs peuvent être installés à divers endroits du processus pour surveiller des paramètres tels que la température, la concentration chimique et la pression.

2.8.3 Applications du trafic routier

Les RCSF peuvent être utilisés pour surveiller et gérer la circulation routière, ainsi que pour suivre le mouvement des objets dans des zones telles que les champs. En employant des algorithmes d'analyse spécifiques, il est possible d'effectuer le comptage des véhicules ou des individus, permettant ainsi d'estimer le niveau de trafic selon les plages horaires.

2.8.4 Applications environnementales

La surveillance des paramètres environnementaux par le biais de réseaux de capteurs a engendré de nombreuses applications dans le domaine de l'environnement. Ci-dessous, nous présentons quelques exemples d'applications des réseaux de capteurs dans ce domaine :

- **Détection de feu de forêts** : Les réseaux de capteurs sont souvent déployés d'une manière aléatoire et à haute densité dans les zones forestières. Leur présence permet la détection précoce des départs de feu ainsi que leur origine, ce qui facilite la mise en œuvre de mesures préventives contre les incendies de forêt avant qu'ils ne se propagent.
- **Agriculture** : les réseaux de capteurs offrent la possibilité de surveiller en temps réel divers paramètres tels que le niveau de production, la présence de pesticides dans l'eau potable, l'érosion des sols et la pollution de l'air. Cette surveillance permet aux exploitations agricoles d'ajuster leurs pratiques et de réagir de manière appropriée aux changements climatiques et environnementaux.
- **Découverte des catastrophes naturelles** : vu que les capteurs peuvent être déployés n'importe où dans la nature, ils peuvent signaler ou prédire des catastrophes naturelles tels que les tremblements de terre, les tempêtes ou les ouragans ainsi que les inondations. Cela permettra une intervention beaucoup plus rapide et plus efficace des secours.

2.8.5 Applications liées à la sécurité

Les RCSF peuvent être déployés pour assurer la sécurité tant des zones privées que publiques. Toutefois, l'intérêt réel des RCSF pour les applications électroniques ne se limite pas à la surveillance des espaces clos, mais s'étend également aux environnements ouverts. Dans cette optique, une variété de produits est disponible sur le marché, incluant des capteurs sans fil de mesure, des micro-caméras et d'autres dispositifs de surveillance. Ces solutions reposent

sur diverses méthodes, protocoles de routage et technologies de communication. Des capteurs à faible consommation énergétique peuvent être déployés, complétés par des capteurs riches en ressources, afin de protéger des espaces tels que les parcs, les industries forestières ou agricoles, les zones sauvages, et d'autres régions importantes pour la préservation des ressources naturelles.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les concepts fondamentaux liés aux RCSF, ce qui constitue une base pour comprendre le travail exposé dans la suite de ce mémoire. Dans le chapitre suivant, nous aborderons la problématique centrale de notre travail, qui concerne la collecte de données avec un puits mobile.

Chapitre 3

Collection par puits mobile dans les RCSF

3.1 Introduction

Ce chapitre explore les détails relatifs à la collecte de données par un puits mobile dans les RCSF, explorant dans un premier temps les différentes formes de mobilité que nous pouvons avoir dans de tels réseaux. Il met en avant les avantages tels que l'augmentation de la durée de vie, la fiabilité accrue et la sécurité. Le chapitre examine aussi les schémas de mobilité du nœud puits (aléatoire, prévisible, contrôlée), les défis associés, des exemples de scénarios, et conclut avec une discussion approfondie, de quelques travaux connexes.

3.2 Formes de mobilité dans un RCSF

La recherche récente sur la mobilité dans les RCSF a démontré que l'introduction d'éléments mobiles peut considérablement améliorer la connectivité et la durée de vie de ces réseaux. Les nœuds mobiles, capables de communiquer avec d'autres nœuds du réseau, résolvent le problème de connectivité en transportant des informations entre des parties isolées des RCSF. La mobilité réduit la distance de communication, améliorant ainsi la durée de vie du réseau en réduisant les communications multi-sauts. Un problème majeur des déploiements statiques est la formation de goulots d'étranglement sur les nœuds proches du récepteur, entraînant une augmentation de la charge moyenne sur ces nœuds. La mobilité contribue à résoudre ce problème en déployant des nœuds et des puits de capteurs mobiles dans le réseau. Des études, telles que celle menée par Wang et al [7], démontrent que les éléments mobiles améliorent significative-

ment la durée de vie du réseau. Dans un RCSE, la mobilité peut apparaître sous trois formes principales [8] : mobilité des nœuds capteurs, mobilité de l'évènement et mobilité du nœud puits. Ces trois formes sont présentées dans les trois sections suivantes.

3.2.1 Mobilité des nœuds capteurs

La figure 3.1a présente la mobilité des nœuds capteurs dans le contexte d'une application de surveillance du bétail (par exemple, des capteurs attachés au bétail). Cette mobilité des capteurs peut influencer les protocoles au niveau du réseau. Il est essentiel que le réseau se réorganise régulièrement pour garantir un fonctionnement correct, avec des compromis entre la fréquence/vélocité du déplacement des nœuds et l'énergie nécessaire au maintien du niveau de fonctionnalité souhaité dans le réseau.

3.2.2 Mobilité de l'évènement

Dans des contextes tels que la détection d'événements, notamment dans des scénarios de suivi, il est possible que la cause des événements ou des objets à surveiller soit mobile. La situation d'évènement mobile est explicitée dans la Figure 3.1b, où la mission consiste à repérer un char en mouvement dans une application de protection des frontières et à le suivre pendant ses déplacements. Étant donné que la localisation de l'évènement évolue au fil du temps, les nœuds capteurs responsables de la détection de l'évènement (c'est-à-dire les nœuds sources) évoluent également en fonction du temps.

3.2.3 Mobilité des nœuds puits

Les nœuds puits, responsables de la demande de données, peuvent se déplacer en raison, par exemple du déplacement des utilisateurs finaux transportant ces nœuds au sein du réseau. Dans une situation de réponse à une catastrophe, par exemple, un pompier peut solliciter des données liées à un événement auprès des nœuds capteurs tout en se déplaçant à travers le réseau, comme illustré sur la figure 3.1c. La mobilité du nœud puits influence également significativement les protocoles au niveau de la couche réseau. Le réseau, éventuellement avec l'assistance du nœud puits mobile, doit prendre des dispositions pour que les données demandées puissent suivre et atteindre effectivement le nœud puits malgré ses mouvements.

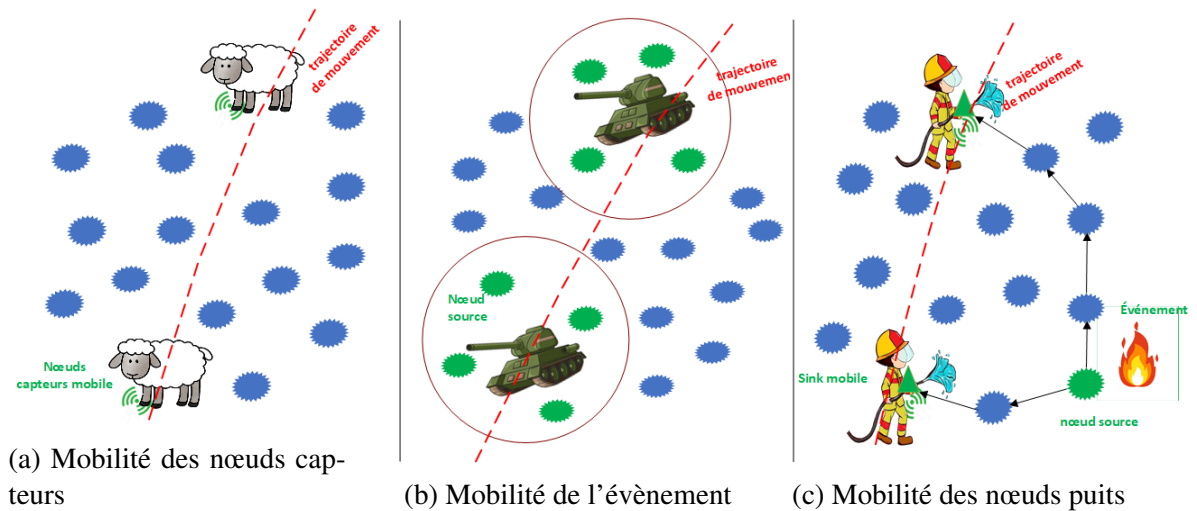


FIGURE 3.1 – Formes de mobilité dans un RCSF.

3.3 Avantages de la mobilité dans un RCSF

La mobilité dans les RCSF présente des avantages majeurs, tels que [9] :

- **Réduction de la charge énergétique :** Le puits mobile distribue la charge entre différents ensembles de nœuds capteurs en fonction de son mouvement, atténuant ainsi le problème des trous énergétiques et réduisant la consommation d'énergie des capteurs proches du puits.
- **Fiabilité de la collecte de données :** En se déplaçant près des nœuds capteurs, le puits mobile garantit une collecte fiable des données, même dans des régions difficilement accessibles.
- **Réduction des transmissions de paquets :** En minimisant le nombre de sauts nécessaires pour collecter les données, le puits mobile diminue les transmissions de paquets, améliorant la fiabilité, le débit et réduisant la probabilité de perte de paquets et la latence.
- **Augmentation de la durée de vie du réseau :** en réduisant la distance entre capteurs et puits, et minimisant les communications multi-sauts.
- **Gestion des réseaux épars :** Le puits mobile peut naviguer sur différentes régions du réseau pour collecter des données, facilitant la gestion de réseaux épars et déconnectés.
- **Sécurité accrue :** Dans des contextes où la sécurité est cruciale, le puits mobile devient une solution fiable, rendant difficile le suivi de sa localisation ou l'accès à des données sensibles par des adversaires.

3.4 Schémas basiques de mobilité du nœud puits

Dans les RCSF, la mobilité du nœud puits se présente sous trois formes principales [8, 10] : la mobilité aléatoire, la mobilité prévisible/à trajectoire fixe et la mobilité contrôlée.

3.4.1 Modèle de mobilité aléatoire/Imprévisible

Ce modèle décrit un schéma de déplacement où les mouvements des entités, tels que les nœuds ou les objets, sont imprévisibles et aléatoires. Dans ce contexte, les déplacements ne suivent aucun schéma ou trajectoire prédéfinis, ce qui rend difficile la prédiction de la position des entités à un moment donné. Par exemple, dans un RCSF, un nœud puits peut être associé à un animal en mouvement. Dans cette configuration, le nœud puits n'a aucune influence sur les déplacements de l'animal, et ses propres déplacements dépendent de la vitesse et de la direction de cet animal.

3.4.2 Modèle de mobilité prévisible /à Trajectoire fixe

La mobilité prévisible désigne le cas où les déplacements sont anticipés mais immuables. Cette prévisibilité peut toutefois être exploitée dans le routage des données. L'intégration du relais de données avec une mobilité prévisible des puits, peut renforcer l'efficacité énergétique de la transmission des données. Les capteurs peuvent anticiper le moment du transfert de données en se basant sur la trajectoire du nœud mobile. Ainsi, ils deviennent actifs au moment prédit du transfert, sinon ils passent en mode veille jusqu'à ce que le transfert soit imminent, ce qui permet de préserver l'énergie. Un exemple concret de mobilité prévisible est la circulation des véhicules tels que les transports en commun (trains, bus). Ces véhicules peuvent servir de puits mobiles dans les RCSF à grande échelle, notamment pour des applications comme la surveillance de la pollution.

3.4.3 Modèle de mobilité contrôlée

Dans ce schéma, l'utilisateur ou l'observateur du réseau contrôle le mouvement du puits mobile. Selon l'application, le puits mobile ajuste sa trajectoire d'une manière spécifique afin d'améliorer la livraison des données. Par exemple, dans toute application, un problème critique se pose en cas de retard dans la livraison des messages dans le réseau. Dans ce cas, le puits est

déplacé vers la zone de diffusion afin de réduire les transmissions multi-sauts dans le réseau.

3.5 Défis liés à cette mobilité du nœud puits

Bien que le nœud puits mobile présente certains avantages, il engendre une série de défis complexes associés à la gestion de la connectivité, à la consommation d'énergie, aux algorithmes de routage, à la synchronisation, à la sécurité, ainsi qu'à l'équilibrage de charge au sein des réseaux. Les défis induits par l'incorporation d'un nœud puits mobile dans les RCSF comprennent [9] :

- **La diffusion de l'information de localisation la plus récente du puits aux nœuds capteurs :** Il est essentiel d'informer les nœuds capteurs de la localisation actuelle du nœud puits afin d'optimiser les transmissions de données et de garantir la connectivité. Ce problème se présente dans le cas des modes de communication événementiel et à la demande.
- **Identification des emplacements de séjour optimaux :** Il est essentiel de cibler les emplacements où le nœud puits doit demeurer sur de longues périodes afin de maximiser l'efficacité du réseau. Cette démarche nécessite une analyse approfondie de la couverture du réseau, de la qualité de la communication, ainsi que de la consommation d'énergie. Ce besoin se manifeste en particulier lorsqu'un mode de communication périodique est appliqué où tous les nœuds émettent leurs données périodiquement.
- **Détermination de la trajectoire optimale du nœud puits :** La détermination de la trajectoire optimale pour le nœud puits s'avère complexe, car elle dépend de multiples facteurs incluant la densité des nœuds capteurs, les conditions du terrain, les contraintes de communication, ainsi que les objectifs de la mission.
- **Évitement d'obstacles :** En se déplaçant, le nœud puits peut faire face à des obstacles physiques ou à des zones ayant une connectivité limitée, entravant ainsi la transmission des données. Le système doit être en mesure de repérer et d'éviter ces obstacles afin de préserver la connectivité avec les nœuds capteurs.

3.6 Exemples de scénarios applicatifs

Les puits mobiles dans les RCSF peuvent revêtir différentes formes et configurations en fonction des besoins et des contraintes des applications spécifiques. Parmi les formes courantes, on retrouve les drones aériens ((UAV), pour Unmanned Aerial Vehicle), les véhicules terrestres autonomes ((UGV) pour Unmanned Ground Vehicles), les véhicules maritimes sans pilote ((UMV), pour unmanned maritime vehicles), les robots terrestres et les ballons stratosphériques. Chacune de ces formes offre des avantages particuliers en termes de mobilité, de portée, de capacité de charge utile et d'adaptabilité à divers environnements. Ces puits mobiles sont conçus pour se déplacer efficacement dans des zones ciblées, collecter des données à partir des capteurs dispersés et fournir des informations cruciales pour des applications telles que l'agriculture de précision, la gestion des catastrophes et la surveillance environnementale. De plus, les puits mobiles peuvent également être des dispositifs portés par des humains ou des animaux selon l'application spécifique. Ces puits mobiles trouvent des applications pratiques dans divers scénarios du monde réel, améliorant ainsi les performances et l'efficacité du réseau. Voici quelques exemples de scénarios du monde réel où les puits mobiles sont bénéfiques :

- **Agriculture de précision** : dans l'agriculture de précision, les puits mobiles peuvent être déployés pour collecter des données à partir de nœuds capteurs répartis dans de vastes champs agricoles. En se déplaçant de manière stratégique, ils peuvent collecter efficacement des données sur les niveaux d'humidité du sol, les variations de température et la santé des cultures, permettant aux agriculteurs de prendre des décisions éclairées pour l'irrigation et la fertilisation [11, 12] .
- **Gestion des catastrophes** : pendant les opérations de gestion des catastrophes, telles que la réponse aux tremblements de terre ou la surveillance des incendies de forêt, les puits mobiles peuvent être utilisés pour collecter des données critiques à partir de nœuds capteurs déployés dans les zones affectées. La mobilité des puits permet une collecte de données dynamique et une analyse en temps réel, aidant à la prise de décision et à l'allocation de ressources pour les équipes d'intervention d'urgence [13, 14] .
- **Surveillance de la faune** : dans les efforts de conservation de la faune, les puits mobiles peuvent être utilisés pour suivre les mouvements et le comportement des animaux à l'aide de nœuds capteurs placés dans des habitats naturels. En se déplaçant le long de routes prédéfinies ou en s'adaptant aux schémas de migration des animaux, les puits

mobiles permettent aux chercheurs de collecter des données précieuses sur les populations animales sans perturber leur environnement naturel [15, 16] .

Ces scénarios illustrent comment les puits mobiles jouent un rôle vital dans diverses applications, allant de l'agriculture et la gestion des catastrophes à la surveillance de la faune, en optimisant la collecte de données, en améliorant l'efficacité énergétique et en améliorant les performances du réseau.

3.7 Travaux connexes

Le domaine des RCSF a connu une croissance significative, motivée par la nécessité de collecter des données de manière efficace dans des environnements divers. En vue de répondre à ces défis, plusieurs travaux de recherche novateurs ont émergé, chacun visant à améliorer des aspects spécifiques des RCSF tels que l'efficacité énergétique, la gestion des délais, et la durabilité du réseau. Dans cette section, nous présenterons quelques travaux récents qui propose une collection de données par puits mobile dans un RCSF. Cette présentation sera suivie d'une discussion dans laquelle nous partagerons nos observations sur ces études examinées.

3.7.1 Travaux sélectionnés

Dans la suite, nous aborderons quelques travaux liés à notre recherche. Plus particulièrement, nous fournirons une brève description de six travaux de la littérature.

A Query driven Backbone based Routing for Mobile Sink based Wireless Sensor Networks (QBR)

Le protocole de routage QBR [17], est une solution spécifique conçue pour RCSF avec des puits mobiles. Ce protocole vise à optimiser le routage des données dans de tels réseaux en établissant une structure dorsal virtuel. En établissant un réseau dorsale virtuelle au cœur du champ de capteurs, il permet à certains nœuds de devenir des nœuds dorsaux, formant ainsi un arbre interne pour la transmission des données. Les nœuds arborescents assurent la gestion des informations sur l'emplacement du puits et la transmission des données, tandis qu'un mécanisme de maintenance de l'arbre garantit la stabilité du réseau en remplaçant les nœuds d'arbre à faible énergie.

Approche	Mode de communication	Schéma de mobilité	Structure virtuelle	Nombre de puits	Consommation énergétique	Équilibrage de consommation	Latence
QBR	Basé requête	Aléatoire	backbone	un seul	soutenu	soutenu	non soutenue
ECMRD	périodique	à trajet fixe	Cluster Backbone	Un seul	Soutenue	Soutenue	Non soutenue
VGDR	Périodique	Aléatoire	Grille	un seul	Soutenue	Soutenue	non Soutenue
EDEDA	périodique	à trajet fixe	Grille	Un seul	Soutenue	Soutenue	Soutenue
TARA	périodique	à trajet fixe	Grille	un seul	Soutenue	Soutenue	Soutenue
PPCM	Basé sur des événements	à trajet fixe	Cluster	multiple(4)	Non Soutenue	Soutenue	Non Soutenue

TABLE 3.1 – Résumé des protocoles de routage examinés.

A Virtual Grid-Based Dynamic Routes Adjustment Scheme for Mobile Sink-Based Wireless Sensor Networks (VGDRA)

VGDRA [18] est un schéma qui repose sur l'utilisation d'une grille virtuelle pour organiser et optimiser le trafic des données. En substance, VGDRA consiste à diviser la zone géographique couverte par le réseau en une grille virtuelle, où chaque cellule de la grille représente une zone géographique spécifique. À chaque instant, en fonction des conditions de trafic en temps réel, des ajustements sont effectués au niveau de la grille pour optimiser les routes de communication. Ce schéma permet une adaptation dynamique des routes de communication en fonction des changements dans les conditions du réseau, tels que la congestion, les pannes, ou les variations de la demande. En utilisant cette approche, VGDRA vise à améliorer l'efficacité, la fiabilité et les performances du réseau, tout en réduisant les temps de latence et les congestions.

Energy-Efficient Clustering with Mobile Sink and Rendezvous Nodes for Data Collection (ECMRD)

ECMRD [19] est une méthode qui s'appuie sur une sélection judicieuse des chefs de cluster, visant à équilibrer la charge de travail parmi eux, et l'intégration de nœuds de rencontre ainsi que d'un puits mobile pour une collecte de données efficace. Le réseau est organisé en plusieurs clusters, avec des nœuds de rencontre placés stratégiquement à proximité du trajet du puits mobile, facilitant ainsi la transmission des données. Durant la phase de fonctionnement stable du réseau, les nœuds transmettent leurs données aux chefs de cluster dans des intervalles de temps prédéfinis. Ces derniers, après avoir agrégé les données, choisissent de les envoyer soit au puits mobile soit à un nœud de rencontre proche, réduisant significativement la consommation d'énergie. Pour maximiser l'économie d'énergie, les nœuds membres éteignent leur émetteur-récepteur hors de leurs périodes de transmission, tandis que ceux des nœuds de rencontre et des chefs de cluster restent actifs en permanence, assurant ainsi une gestion de l'énergie optimale et prolongeant la durée de vie du réseau .

Trajectory Planning and Route Adjustmen (TARA)

TARA [20] est une stratégie innovante pour la planification de trajectoire et l'ajustement de route dans les RCSF, focalisée sur les déplacements préétablis des puits de données dans un environnement IoT. Cette méthode repose sur une grille pour optimiser la distribution de

la charge de travail parmi les nœuds capteurs, réduire les délais de collecte des données et limiter les ajustements de route nécessaires. En suivant un itinéraire prédéfini qui traverse les zones clés du champ de captage, le collecteur mobile s'arrête à des cellules de rendez-vous stratégiquement placées pour une collecte de données efficace, tout en minimisant la consommation d'énergie et en équilibrant la charge entre les chefs de cellule de grille ((GCH)). Cette organisation permet une communication directe et efficace entre les GCH pour le transfert de données, réduisant ainsi le besoin fréquent d'ajustements de route et favorisant une distribution énergétique équilibrée, ce qui prolonge la durée de vie du réseau. TARA introduit également un mécanisme pour maintenir l'efficacité des GCH en remplaçant les nœuds défectueux par d'autres plus énergétiques et mieux positionnés, garantissant la pérennité du réseau .

Energy and Delay Efficient Data Acquisition (EDED)

EDED [21] est un algorithme conçu pour optimiser l'efficacité énergétique et minimiser les délais dans la collecte de données au sein des RCSF, grâce à une sélection stratégique des chefs de cellule de grille (GCH) et une planification soignée des trajets pour un collecteur de données mobile. L'approche repose sur la division du champ de capteurs en une grille virtuelle où chaque cellule élit un GCH basé sur des critères tels que l'énergie résiduelle et la proximité avec le centre de la cellule. Ces GCHs sont responsables de l'agrégation et de la transmission des données au collecteur de données mobile qui suit un itinéraire préétabli, optimisé pour réduire la consommation d'énergie et les délais de transmission. Le parcours du collecteur est déterminé par des points de visite (VP) stratégiquement placés pour assurer une collecte efficace des données de plusieurs GCHs en un seul saut. EDED inclut également un mécanisme de réélection des GCHs pour préserver l'équilibre énergétique du réseau et prolonger sa durée de vie .

Predefined Path Constrained Mobility (PPCM)

Le protocole de routage (PPCM) [10] est une approche qui est proposée pour améliorer la collecte de données dans les RCSF. En se concentrant sur des trajectoires fixes prédéfinies pour les puits mobiles, le PPCM surmonte les défis associés aux techniques de mobilité prédite. Cette méthode utilise quatre puits mobiles qui suivent un motif fixe, réduisant ainsi la consommation d'énergie des nœuds capteurs et minimisant la surcharge du réseau. Par ailleurs, PPCM, en tant que protocole de gestion des flux de données, s'appuie sur l'utilisation de chemins prédéfinis

pour chacun des quatre noeuds puits considérés. Ces chemins sont établis en tenant compte de la qualité de service, de la priorité des données et des contraintes de sécurité. Lors des déplacements, le protocole garantit un transfert de données efficace en suivant les chemins prédéfinis associés à chaque appareil. Cette approche cherche à minimiser les retards de transmission, à optimiser l'utilisation des ressources réseau et à offrir une expérience utilisateur fluide, même dans des environnements de mobilité élevée. Ainsi, PPCM présente une solution intéressante pour la gestion des flux de données, répondant aux besoins de mobilité tout en garantissant une qualité de service optimale.

3.7.2 Discussion

À partir de cette étude de travaux, nous pouvons tirer les constatations suivantes :

- **Dépendance du modèle de mobilité et du mode de communication** : Les solutions proposées dépendent fortement du modèle de mobilité du nœud puits (aléatoire, à trajectoire fixe ou contrôlée) ainsi que du mode de communication (événementiel, périodique ou à la demande). Cela implique que chaque combinaison de modèle de mobilité et de mode de communication nécessitera une adaptation spécifique pour résoudre les défis qui lui sont propres. Par exemple, dans un mode de communication basé événement, la dissémination de la position du nœud puits devient un problème crucial, tandis que ce problème n'est pas aussi critique lorsque le nœud puits se déplace de manière périodique d'un point de rendez-vous à un autre.
- **Besoin à prendre en compte la latence des communication** : il est important de reconnaître que dans des scénarios de communication en temps réel ou à haute exigence de performance, la latence peut devenir un facteur critique. Le fait que la latence ne soit pas prise en compte dans les spécifications pourrait limiter l'applicabilité des approches étudiées dans des cas d'utilisation où la réactivité et la rapidité de transmission des données sont essentielles.
- **Complexité de la gestion de multiples nœuds puits mobiles** : La présence de plusieurs nœuds puits mobiles ajoute une complexité supplémentaire à la gestion et à la coordination du réseau. Les approches étudiées doivent être capables de gérer efficacement la mobilité et les interactions entre les différents nœuds puits pour assurer un fonctionnement cohérent et efficace du réseau.

3.8 Conclusion

Ce chapitre a abordé en détail la problématique de la collecte des données par puits mobile dans les RCSF. À travers une exploration minutieuse, nous avons examiné les différentes formes de mobilité dans les RCSF, les avantages associés à la collection par puits mobile, les schémas de mobilité du nœud puits, ainsi que les défis inhérents à cette mobilité. En outre, nous avons présenté des exemples de scénarios et discuté des travaux connexes pertinents. Ce chapitre constitue ainsi un socle solide pour la compréhension approfondie des enjeux liés à la collecte des données par puits mobile dans les RCSF.

Après cette exploration, nous passerons à la description des détails relatifs à notre solution proposée pour répondre au besoin de la dissémination efficace et continue de la position la plus récente du puits en mouvement aléatoire dans un RCSF.

Chapitre 4

Contribution

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les détails relatifs à notre approche proposée que nous avons nommée (EMSPU) comme acronyme de «Efficient Mobile Sink Position Update Protocol». Nous allons tout d'abord présenter le modèle réseau adopté dans cette étude. Ensuite, nous donnerons un aperçu de la solution proposée, pour ensuite passer à une description détaillée dans laquelle nous présenterons les principales structures de données utilisées au niveau de chaque nœud, les principaux messages utilisés, ainsi que les différentes étapes de notre solution.

4.2 Modèle réseau

Comme évoqué précédemment dans le première chapitre, un RCSF se compose d'un vaste ensemble de nœuds capteurs, pouvant atteindre des centaines voire des milliers d'unités, qui sont habilités à recueillir, traiter et transmettre des données (de façon autonome). Notre étude repose sur le modèle réseau suivant :

- Notre réseau est constitué d'un ensemble de nœuds capteurs statiques et également d'un seul nœud puits mobile, lequel est conçu pour se déplacer de manière aléatoire.
- Chaque nœud du réseau possède ses propres coordonnées, une information essentielle dans un RCSF pour localiser les événements en temps opportun et entreprendre les actions appropriées en conséquence.

- Les nœuds capteurs ont la capacité d'adapter leurs portées de communication en modifiant leurs niveaux de puissance de transmission, tout en restant dans les limites d'une puissance maximale P_{max} associée à une portée maximale R_{max} .
- Soit $G = \{V, E\}$ le graphe qui modélise la topologie de notre RCSF où :
 - $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ est l'ensemble de sommets qui correspondent aux différents nœuds du réseau.
 - Et E l'ensemble d'arcs (liens) reliant ces nœuds. Il est défini comme suit :

$$E = \{(u, v) \mid u \in V, v \in V, \delta_{u,v} \leq R_{max}\} \quad (4.1)$$

où $\delta_{u,v} = \sqrt{(x_u - x_v)^2 + (y_u - y_v)^2}$ est la distance euclidienne entre les deux nœuds u et v , sachant que $u = (x_u; y_u)$ et $v = (x_v; y_v)$.

- La transmission des données suit un schéma événementiel, impliquant que dès qu'un événement est détecté, les nœuds capteurs responsables envoient les informations pertinentes au nœud puits.

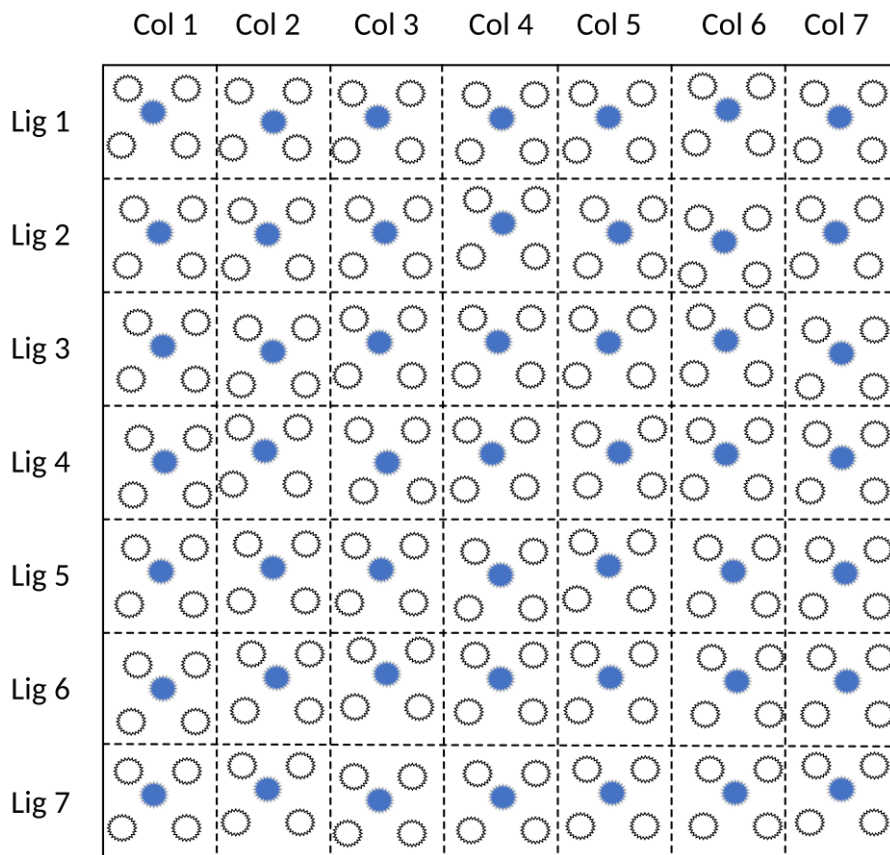


FIGURE 4.1 – Organisation des nœuds capteurs à l'aide d'une grille 7×7 .

4.3 Aperçu de la solution proposée

Notre solution proposée EMSPU opère suivant les étapes suivantes :

1. La première étape consiste à construire une grille qui divisera la zone de captage en plusieurs cellules. Cette grille doit comporter K lignes et K colonnes, donc une grille carré ($K \times K$), avec l'obligation que K doit être impair. Une telle grille est illustrée par la figure 4.1.
2. La deuxième étape consiste à sélectionner un chef (cluster-head, CH) parmi les nœuds qui se situent dans la même cellule, comme illustré toujours dans la figure 4.1. Ce chef agira en tant que représentant du groupe et servira de point de passage pour les communications des membres du groupe.
3. Une fois les CH élus, la troisième étape implique la sélection d'un sous-groupe de nœuds capteurs chargés d'enregistrer en permanence la position la plus à jour du nœud puits. Comme illustré dans la figure 4.2, ce sont les CH de la ligne et de la colonne du milieu de la grille qui joueront ce rôle. En fait, c'est la raison pour laquelle nous exigeons que K soit impair.
4. La quatrième étape consiste à décrire le processus de diffusion et de maintien de la position actuelle du nœud puits à travers les divers nœuds sélectionnés lors de l'étape précédente.
5. La cinquième étapes explique comment les données détectées par un nœud capteur en réponse à un événement sont acheminées vers le nœud puits. Chaque nœud détectant un événement doit, tout d'abord, demander la position actuelle du nœud puits des CH responsables de la sauvegarde de cette position avant de pouvoir envoyer ses données.
6. La sixième et dernière étapes implique la réélection de nouveaux CH lorsque l'énergie résiduelle de ces derniers arrive à un certain seuil afin de prévenir la défaillance prématurée des premiers nœuds remplissant cette fonction.

4.4 Description détaillée de notre solution

Dans cette section, nous présenterons en détail notre solution, qui est organisée en trois sous sections principales. Tout d'abord, nous examinerons la structure de données que nous utilisons pour implémenter notre solution. Ensuite, nous décrirons les différents types de messages im-

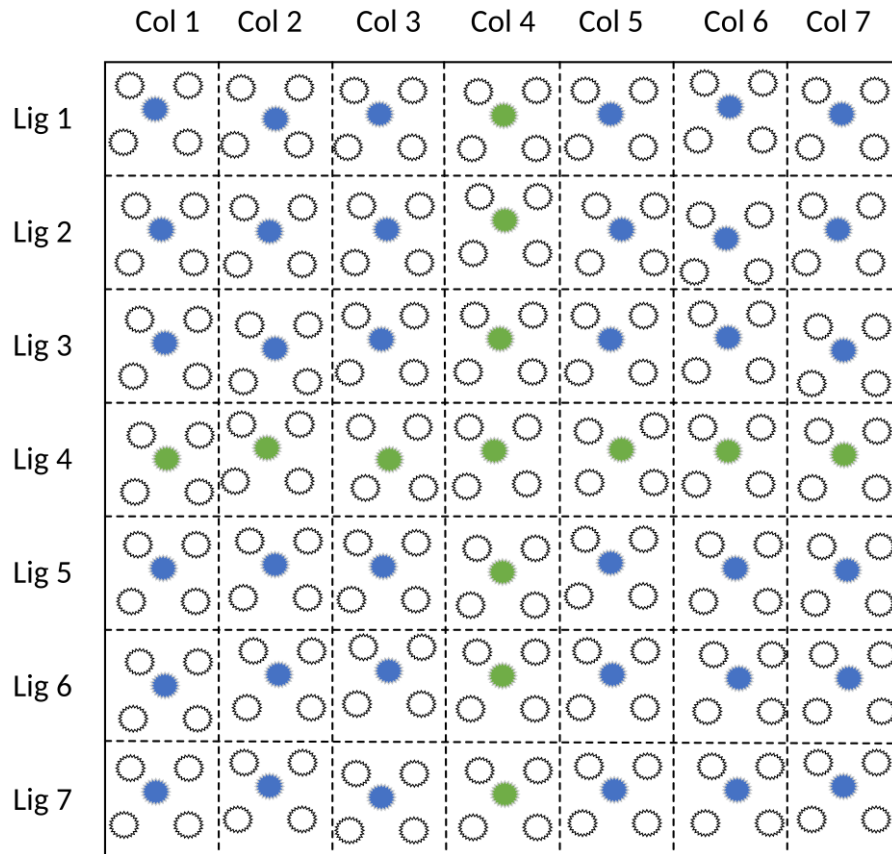


FIGURE 4.2 – La sélection des nœuds responsables de la sauvegarde de la position courante du puits (les nœuds qui sont en couleur verte).

pliqués dans le fonctionnement de notre solution. Enfin, nous expliquerons les étapes clés de notre solution, en détaillant le processus suivi pour atteindre notre objectif.

4.4.1 Structures de données utilisées

Nous différencions deux types de structures : celles utilisées au niveau des nœuds capteurs et celles utilisées au niveau du nœud puits.

Structures de données utilisées au niveau du nœud capteur

Les principales structures de données qui sont utilisées par un nœud capteur i sont comme suit :

- Id_i : correspond à l'identifiant du nœud capteur i .
- $Coordinate_i$: les coordonnées du nœud i .
- $CoordinateCell_i$: les coordonnées de la cellule (numéro de ligne et de colonne) à la-

quelle le nœud i appartient dans la grille formée.

- $IdCell_i$: correspond à l'identifiant de la cellule du nœud i .
- E_i : l'énergie résiduelle du nœud i .
- $IdPuits$: l'identifiant du nœud puits.
- $IdCh_i$: identifiant du CH de la cellule à laquelle i appartient.
- K : le nombre de lignes et de colonnes de la grille.
- $MembersTable_i$: c'est une table qui comporte les différentes informations relatives aux autres membres de la même cellule de i . Une entrée de cette table comporte l'identifiant de chaque membre, les coordonnées de ce dernier et son énergie résiduelle.

Structures de données utilisées au niveau du nœud puits

Le nœud puits fait particulièrement usage des structures suivantes : son propre identifiant et ses coordonnées individuelles.

4.4.2 Liste des messages utilisés

Plusieurs types de messages sont utilisés pour assurer le bon déroulement des différentes opérations de notre solution. Voici dans ce qui suit les détails relatifs à chacun des messages. Le tableau 4.1 illustre cette liste de messages.

Message d'élection du CH (CH_ELECTION)

Ce message est envoyé par chaque nœud capteur dans un cluster au début de chaque processus d'élection d'un CH. Il a pour but de permettre à chaque nœud de connaître les autres membres de son cluster et leurs informations respectives. Un tel message est constitué des champs suivants :

- Identifiant du nœud émetteur.
- Coordonnées de cet émetteur.
- Identifiant de la cellule de cet émetteur.
- Énergie résiduelle de cet émetteur.

TABLE 4.1 – Tableau des messages utilisés.

Message	Rôle
CH_ELECTION	Émis par chaque noeud capteur lors du processus d'élection pour informer les autres membres de ses propres informations.
CH_ANNOUNCEMENT	Émis par chaque CH nouvellement élu pour informer les autres membres du cluster de son nouveau rôle de chef.
UPDATING_SINK_POSITION_MESSAGE	Message de mise à jour de la position du puits sur l'ensemble des CH responsables de l'enregistrement de cette position.
ASKING_SINK_POSITION_REQUEST	Message de demande de la position du puits
ASKING_SINK_POSITION_REPLY	Message de réponse de la demande de la position
DATA	Message utilisé pour envoyer les données collectées.
CH_REELECTION	Message utilisé par les CH pour déclencher le processus de ré-élection d'un autre CH lorsque nécessaire.

Message d'annonceur du rôle CH (CH_ANNOUNCEMENT)

Ce message est diffusé par chaque CH après chaque élection pour informer les autres membres du cluster de leur nouveau chef. Il comprend les champs suivants :

- Identifiant du CH.
- Coordonnées du CH.
- Identifiant de la cellule à laquelle il appartient.

Message de mise à jour de position (Updating_Sink_Position_Message)

Il initié par le noeud puits lors de son déplacement vers une nouvelle position. Ce message est relayé d'un CH à un autre jusqu'à atteindre un CH faisant partie de l'ensemble des CH responsables de l'enregistrement de la position du puits. Ce dernier CH initie ensuite sa diffusion aux autres CH (d'un CH à un autre) dans cet ensemble. Il comprend les champs suivants :

- Identifiant de la prochaine cellule à laquelle ce message doit être relayé.
- Nouvelles coordonnées du puits.

- Durée de la pause dans cette nouvelle position.

Message de demande de la position du puits (Asking_Sink_Position_Request)

Il est envoyé par un nœud capteur détectant un événement. Ce message est utilisé pour obtenir la dernière position du puits des CH centraux, afin que le capteur puisse acheminer ensuite ses données vers ce puits. Les champs constituant ce message sont comme suit :

- Identifiant de la prochaine cellule à laquelle ce message doit être relayé.
- Identifiant du nœud source du message.
- Chemin emprunté par ce message depuis son nœud source jusqu'à son nœud destinataire. Il comporte les identifiants des cellules traversées par ce message. Ce chemin est utilisé principalement afin de pouvoir acheminer la réponse correspondant à cette requête vers la source de cette requête de position en empruntant le chemin inverse.

Message de réponse à la demande de la position du puits (Asking_Sink_Position_Reply)

C'est un message qui est initié par l'un des CH responsables de l'enregistrement de la position du puits comme réponse à la demande de cette position. Il comprend les champs suivants :

- Identifiant du nœud destinataire.
- Coordonnées courantes du puits.
- Chemin inverse du chemin traversé par le message de demande de position.

Message de données (DATA)

Il est envoyé par un nœud capteur détectant un événement, contenant les informations relatives à cet événement. Il comprend les champs suivants :

- Identifiant du nœud destinataire (le puits).
- Identifiant du prochain CH relais du message données.
- Coordonnées courantes du puits.

Message de réélection (CH_RE-ELECTION)

Il est diffusé par chaque CH à son voisinage lorsque son niveau d'énergie résiduelle se trouve au dessous d'un seuil prédéfini. Ce message déclenche le processus de réélection par les nœuds se trouvant dans la même cellule, qui envoient alors des messages CH_ELECTION. Il comporte les champs suivants :

- Identifiant du CH.
- Identifiant de la cellule à laquelle il appartient.
- Son énergie résiduelle.

4.4.3 Étapes de notre solution

Cette section présente les détails de chaque étape de fonctionnement de notre solution EM-SPU depuis l'étape de clusterisation et donc, l'établissement de la grille jusqu'à la réélection des CH.

4.4.3.1 Construction de la grille

La construction de la grille qui divise le terrain de captage en cellules constitue la première étape cruciale dans la mise en place de notre solution et sur laquelle reposent les étapes suivantes du processus. Cette grille est essentielle pour organiser l'espace de déploiement des capteurs de manière structurée, facilitant ainsi la gestion et la communication au sein du réseau.

La grille doit être configurée avec précision, comportant K lignes et K colonnes pour former une grille carrée de dimension $K \times K$. Il est à noter que le choix de K doit être un nombre impair, une condition indispensable au choix des noeuds responsables de la sauvegarde de la position du puits.

Pour déterminer ce nombre k , nous utilisons un facteur d'ajustement α , calculé selon la formule suivante [21] :

$$\alpha = \frac{2\sqrt{2}L}{R_{max}} \quad (4.2)$$

où L représente la largeur du terrain de déploiement, déterminée par les dimensions physiques de la zone à couvrir. R_{max} correspond, comme nous avons déjà présenté dans la section 4.2, à la portée maximale de communication d'un noeud capteur.

Cette formule permet d'ajuster la taille de la grille en fonction des caractéristiques spécifiques du terrain et de la portée maximale de communication des capteurs. Elle nous permet d'assurer que les noeuds dans deux cellules adjacentes peuvent communiquer ensemble.

Sur la base de cette valeur α , le nombre k peut être déterminé comme suit :

$$K = \begin{cases} 5, & \text{si } \alpha \leq 5 \\ 7, & \text{si } 5 < \alpha \leq 7 \\ 11, & \text{si } 7 < \alpha \leq 11 \\ 13, & \text{si } 11 < \alpha \leq 13 \\ \dots & \end{cases}$$

Une fois cette grille établit, chaque nœud capteur doit déterminer l'identifiant de la cellule à laquelle il appartient, $IdCell_i$, en fonction de ses propres coordonnées (x_i, y_i) , comme suit [21] :

$$IdCell_i = (p - 1) * k + q \quad (4.3)$$

Où $p = \lceil \frac{y_i}{a} \rceil$ et $q = \lceil \frac{x_i}{a} \rceil$ sachant que a correspond à la longueur du côté d'une cellule qui est calculée en utilisant la formule suivante : $a = \frac{L}{K}$.

4.4.3.2 Élection du cluster-head

La deuxième étape de notre solution consiste à sélectionner un chef de cluster, un CH, parmi les nœuds de chaque cellule. Ce CH agira comme représentant du groupe de capteurs au sein de la cellule respective, jouant un rôle central dans la coordination des communications et des activités du groupe. Le processus de sélection du CH repose sur deux critères principaux :

- La proximité du barycentre de l'ensemble des noeuds de la cellule. Le nœud choisi comme CH est celui qui est le plus proche du centre de masse (le barycentre) de l'ensemble des membres de la cellule. Cette approche vise à garantir une répartition équilibrée des communications au sein de la cellule, en choisissant un nœud central qui réduit les distances de transmission. Ce barycentre est calculé comme suit :

$$Coord_{\text{Barycentre}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m}, \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m} \right) \quad (4.4)$$

Où m est le nombre de nœuds dans ce cluster.

- Le niveau d'énergie résiduelle des noeuds. le nœud élu en tant que CH doit également avoir un niveau d'énergie résiduelle supérieur à un seuil prédéterminé E_{seuil} . Cette

condition assure que le nœud sélectionné dispose des ressources nécessaires pour assumer les responsabilités supplémentaires liées à sa fonction de CH, telles que la coordination des communications.

Les nœuds capteurs échangent entre eux des messages CH_ELECTION afin que chacun ait les connaissances nécessaires sur les autres membres de sa cellule qui lui permettent d'évaluer sa candidature à être un CH.

Cette sélection de CH est une étape essentielle dans la structuration et la gestion du réseau, visant à établir une hiérarchie fonctionnelle au sein des cellules du réseau. En choisissant soigneusement les nœuds en fonction de leur position et de leurs ressources, cette étape contribue à garantir une communication efficace et une utilisation optimale des ressources dans le réseau.

4.4.3.3 Sélection des nœuds responsables de la sauvegarde de la position du puits

Après l'élection des CH, la troisième étape cruciale consiste à déterminer un sous-groupe de nœuds capteurs chargés de maintenir en permanence la position actuelle du nœud puits. Les CH des cellules de la ligne et de la colonne centrales de la grille sont désignés pour cette tâche spécifique. Cette disposition garantit une couverture efficace de la zone, en s'assurant que des nœuds capteurs sont toujours disponibles pour surveiller et maintenir la position du nœud puits, quel que soit son emplacement dans la grille.

Une telle sélection est rendue possible grâce à l'exigence que K soit impair. Cette exigence assure qu'il existe toujours une ligne et une colonne centrales dans la grille, permettant ainsi de déterminer clairement les nœuds qui joueront le rôle de surveillance du nœud puits.

4.4.3.4 Processus de dissémination et du maintien de la position courante du puits

La position du puits doit être mise à jour continuellement sur l'ensemble des nœuds ayant le rôle de la sauvegarder à chaque nouveau déplacement du puits. Lorsque ce dernier s'arrête dans une nouvelle position, il crée un message Updating_Sink_Position_Message et l'envoie vers un autre CH d'une cellule adjacente à sa cellule courante. Ce CH est choisi sur la base de certaines règles d'acheminement afin de le faire parvenir aux CH des cellules centrales. Le message Updating_Sink_Position_Message est ensuite acheminé d'un CH à un autre jusqu'à ce qu'il arrive à un CH du centre et donc, dont le rôle est la sauvegarde de la position du puits. Lorsqu'un tel CH reçoit ce message, il procède à sa diffusion aux autres CH centrales.

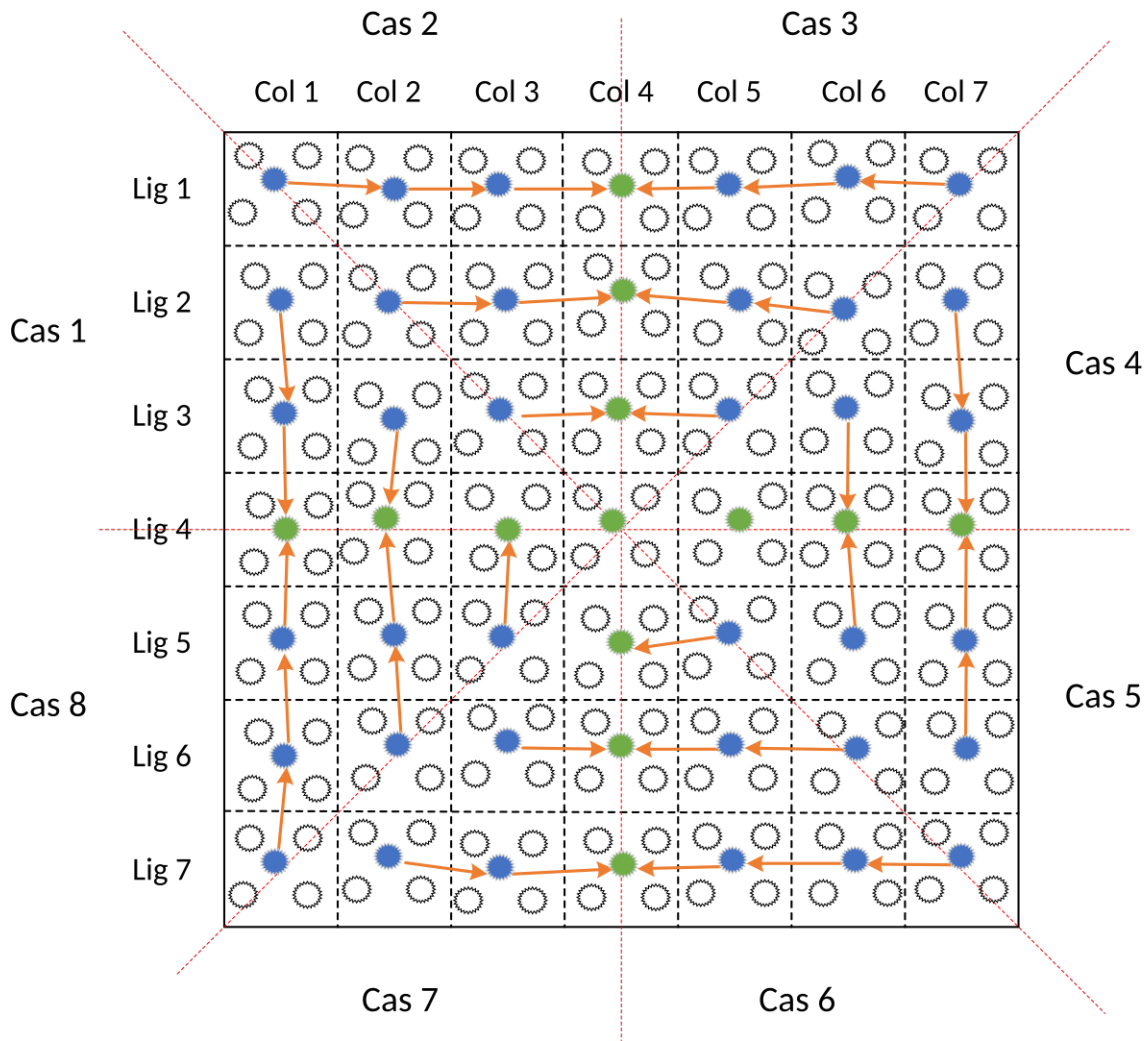


FIGURE 4.3 – Faire correspondre chaque CH dans le réseau avec le CH central approprié de sauvegarde de position.

Revenons maintenant aux règles d’acheminement que nous avons déterminées afin de pouvoir parvenir le message `Updating_Sink_Position_Message` au CH du centre approprié. Ces règles qui sont en nombre de 8 sont déterminées selon les numéros des lignes et des colonnes des cellules. Elles sont illustrées par la figure 4.3 qui montre l’association entre chaque CH dans le réseau et le CH central approprié de sauvegarde de position ainsi que les chemins devant être empruntés pour pouvoir parvenir le message `Updating_Sink_Position_Message` au CH central approprié. Par exemple et comme le montre la figure 4.3, le CH de la cellule (1,2) est associé au CH central de la cellule (1,4), tandis que le CH (7,5) doit contacter le CH de la cellule (7,4).

La table 4.2 présente les différentes règles qui sont appliquées par chaque CH pour acheminer le message `Updating_Sink_Position_Message` vers le CH central approprié. Elle présente le

Cas	Conditions	CH voisin avec lequel il faut communiquer
1	$i < \lceil \frac{K}{2} \rceil, j < \lceil \frac{K}{2} \rceil$ et $i > j$	CH $(i + 1, j)$
2	$i < \lceil \frac{K}{2} \rceil, j < \lceil \frac{K}{2} \rceil$ et $i \leq j$	CH $(i, j + 1)$
3	$i < \lceil \frac{K}{2} \rceil, j > \lceil \frac{K}{2} \rceil$ et $i + j \leq k + 1$	CH $(i, j - 1)$
4	$i < \lceil \frac{K}{2} \rceil, j > \lceil \frac{K}{2} \rceil$ et $i + j > k + 1$	CH $(i + 1, j)$
5	$i > \lceil \frac{K}{2} \rceil, j > \lceil \frac{K}{2} \rceil$ et $i < j$	CH $(i - 1, j)$
6	$i > \lceil \frac{K}{2} \rceil, j > \lceil \frac{K}{2} \rceil$ et $i \geq j$	CH $(i, j - 1)$
7	$i > \lceil \frac{K}{2} \rceil, j < \lceil \frac{K}{2} \rceil$ et $i + j > k + 1$	CH $(i, j + 1)$
8	$i > \lceil \frac{K}{2} \rceil, j < \lceil \frac{K}{2} \rceil$ et $i + j \leq k + 1$	CH $(i - 1, j)$

TABLE 4.2 – Différentes règles d'acheminement (voir figure (4.3)).

CH voisin avec lequel chaque autre CH doit communiquer en fonction de certaines conditions qui sont appliquées au numéro de ligne (i) et de colonne (j) de la cellule du CH en question.

4.4.3.5 Processus de collection de données

La cinquième étape expose la manière dont les données détectées par un nœud capteur sont acheminées vers le nœud puits. À chaque fois qu'un événement est détecté par un nœud capteur, ce dernier doit d'abord demander au CH central avec lequel il est associé de lui renvoyer la position courante du nœud puits. Cela est effectué à l'aide d'un message `Asking_Sink_Position_Request` qui est acheminé selon les mêmes règles cités dans l'étape précédente.

Le CH central recevant ce message répond par un message `Asking_Sink_Position_Reply` contenant la position la plus à jour du puits.

Lorsque le nœud capteur source reçoit cette réponse, il procède à l'envoi de ses propres données en utilisant un routage géographique. En particulier, le CH voisin à choisir comme prochain saut du message données est celui qui assure l'avancement de ce message vers la position courante du puits. La figure 4.4 illustre ce processus de collection.

4.4.3.6 Processus de réélection des cluster-heads

La sixième et dernière étape décrit le processus de réélection périodique des CH pour maintenir l'intégrité et l'efficacité du réseau (comme décrit dans la deuxième étape). Cette réélection permet de prévenir toute défaillance prématurée des nœuds remplissant cette fonction cruciale.

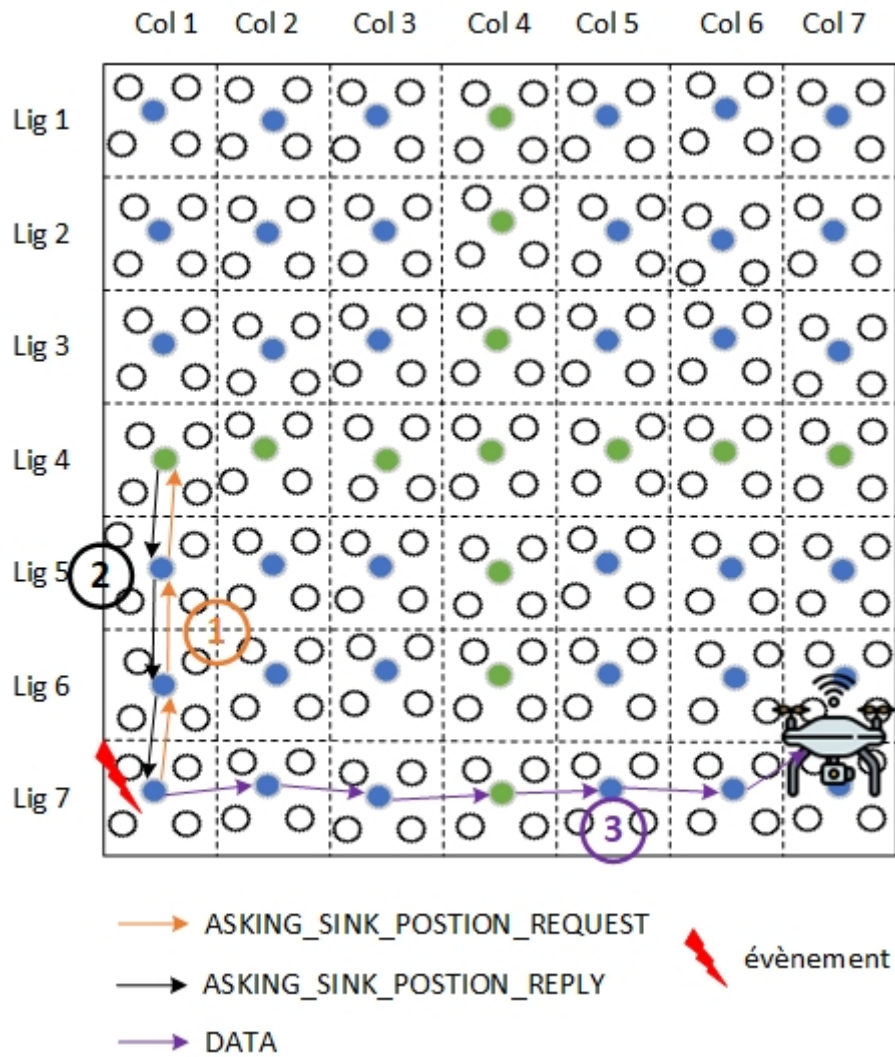


FIGURE 4.4 – Processus de collection de données.

De nouveaux chefs sont élus parmi les nœuds du réseau afin de garantir une gestion continue et efficace des communications entre les nœuds capteurs et le nœud puits. Ce processus assure la stabilité opérationnelle du réseau même en présence de défaillances potentielles, assurant ainsi une surveillance continue et une collecte de données ininterrompue.

Ce processus de réélection est déclenché par chaque CH lorsque son énergie résiduelle arrive à un certain seuil E_{seuil} . Dans ce cas, ce CH diffuse un message CH_RE-ELECTION aux nœuds membres de sa cellule. Chaque membre évalue sa candidature à être un CH de la même manière décrite dans la section 4.4.3.2.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté notre contribution à la résolution du problème défini. Nous avons présenté le modèle réseau appliqué et fourni un aperçu de notre solution. Ensuite, nous avons décrit en détail notre approche, en mettant en lumière la structure de données utilisée, les messages impliqués, ainsi que les différentes étapes de mise en œuvre. Ces éléments constituent un cadre solide pour la résolution efficace du problème abordé.

Chapitre 5

Évaluation des performances

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons le processus de validation de notre approche EMSPU à travers des simulations effectuées avec le simulateur NS-3. Nous avons intégré notre propre approche ainsi qu'une autre de référence que nous expliquerons par la suite dans NS-3. Nous débutons ce chapitre par une brève présentation du simulateur NS-3. Ensuite, nous expliquons en détail la méthodologie de simulation utilisée, en mettant en avant les paramètres spécifiques adoptés pour nos expérimentations et les métriques de comparaison utilisées. Enfin, nous présentons les résultats de nos simulations accompagnés d'une discussion approfondie sur ces résultats.

5.2 Simulateur NS-3

NS-3 [22] est un environnement de simulation des réseaux informatiques largement utilisé dans la recherche et le développement de technologies de communication. Il fournit une plate-forme flexible et extensible pour la modélisation et la simulation de divers protocoles, architectures et applications de réseaux. Il offre des fonctionnalités avancées pour définir des scénarios de simulation réalistes, configurer des paramètres de protocole, et recueillir des données de performance.

NS-3 adopte une architecture basée sur un ensemble de bibliothèques modulaires, permet-

tant aux utilisateurs de configurer leurs simulations en combinant ces bibliothèques selon leurs besoins spécifiques. Cette modularité renforce la réutilisabilité du code, offrant aux utilisateurs la possibilité de gagner du temps en réutilisant des modules existants dans différentes simulations et projets. NS-3 prend également en charge le développement de scripts en C++ et en Python, offrant ainsi une flexibilité supplémentaire. Pour la visualisation des résultats, l'outil NetAnim fourni permet de représenter graphiquement les scénarios de simulation. Il offre des fonctionnalités pour afficher la topologie du réseau, les déplacements des nœuds mobiles (dans le cas des réseaux sans fil mobiles), ainsi que diverses statistiques et métriques de performance en temps réel telles que le débit de données, le taux de paquets perdus, le temps de latence et la charge du réseau pendant la simulation.

L'intégration[23] de nouveaux protocoles dans NS-3 et leur simulation se déroulent selon les étapes suivantes :

- **Implémentation du protocole** : Tout d'abord, le nouveau protocole ou la solution envisagée doit être implémenté en utilisant le langage Python ou C++, le même langage utilisé pour développer NS-3. Cette implémentation doit respecter les directives de conception de NS-3 et s'appuyer sur les fonctionnalités fournies par la bibliothèque de base de NS-3.
- **Description du Scénario de simulation** : Une fois l'implémentation réalisée, il est nécessaire de décrire le scénario de simulation souhaité à l'aide de fichiers de configuration écrits en Python ou en C++. Ces fichiers de configuration permettent de définir les paramètres de simulation, tels que la topologie du réseau, les paramètres des nœuds, les conditions du canal, etc. Ils permettent également de spécifier comment les composants existants ou nouvellement développés doivent être interconnectés dans la simulation.
- **Visualisation avec NetAnim** : Une fois le scénario configuré, l'outil NetAnim peut être utilisé pour visualiser graphiquement le déroulement de la simulation.
- **Analyse des résultats** : Après l'exécution de la simulation, les résultats peuvent être récupérés à partir des fichiers de sortie générés par NS-3. Ces résultats peuvent ensuite être analysés pour évaluer les performances du nouveau protocole et prendre des décisions basées sur les résultats obtenus.

L'intégration de notre solution EMSPU et celle de référence et leurs simulations ont été réalisées en langage C++ en suivant ce processus.

5.3 Méthodologie de simulation

La méthodologie et les paramètres de simulation dans le contexte des réseaux informatiques définissent l'ensemble des procédures et des facteurs utilisés pour évaluer et comparer différentes approches dans ce domaine. Cette section présente les principaux éléments de notre méthodologie de simulation à savoir : le protocole de comparaison considéré, les paramètres de simulation adoptés et le modèle énergétique appliqué.

5.3.1 Protocole de comparaison

Le protocole de comparaison que nous avons employé pour valider notre solution correspond à la solution de référence suivante : chaque nœud capteur qui détecte un événement et doit transmettre des données au puits commence par inonder le réseau avec des messages `Asking_Sink_Position_Request`. Lorsque le puits reçoit ce message, il répond par un autre message `Asking_Sink_Position_Reply` contenant ses coordonnées actuelles, qui emprunte le chemin inverse jusqu'au nœud source du message initial. À ce moment-là, le nœud capteur source commence à envoyer ses données au puits en utilisant un routage géographique.

5.3.2 Modèle énergétique

Les modèles énergétiques sont essentiels dans les RCSF pour évaluer la consommation d'énergie liée aux diverses activités des capteurs. Ils fournissent une base analytique pour comprendre comment les protocoles de communication et les opérations individuelles influent sur cette consommation. Ces modèles permettent de caractériser précisément la consommation d'énergie associée à des aspects spécifiques de la communication et du fonctionnement des capteurs, tels que la transmission, la réception et le traitement des données.

Pour analyser la consommation d'énergie dans le réseau, nous avons utilisé le même modèle de dissipation d'énergie utilisé dans [24]. Ce modèle permet de calculer l'énergie consommée lors de la transmission ou la réception d'un message.

Modèle de consommation d'énergie pour la transmission

. Le modèle [25] quantifie la quantité d'énergie consommée par un capteur lorsqu'il transmet des données à d'autres nœuds du réseau. Il prend en compte des paramètres tels que la distance

de transmission et la taille des paquets pour estimer la consommation d'énergie associée à cette activité[23]. Ce modèle peut être exprimé de manière générale par la formule suivante :

$$E_{TX}(p, d) = \begin{cases} p * E_{elec} + p * E_{Fs}d^2, & \text{si } d < d_0 \\ p * E_{elec} + p * E_{mp}d^4, & \text{si } d \geq d_0 \end{cases} \quad (5.1)$$

La description des différents constituants de cette formule sont comme suit :

- $E_{TX}(p, d)$ représente la consommation d'énergie totale pour la transmission d'un message de p bits sur une distance d .
- E_{elec} est l'énergie électrique nécessaire pour le fonctionnement de l'électronique interne du capteur pendant la transmission.
- E_{Fs} est l'énergie consommée pour transmettre un bit de données dans des conditions de propagation en espace libre.
- E_{mp} est l'énergie consommée pour transmettre un bit de données dans des conditions de propagation multi-trajets.
- d_0 est une distance de seuil qui sépare les deux modèles de propagation (en espace libre et multi-trajets).

Modèle de consommation d'énergie pour la réception

Ce modèle [25, 23]évalue la consommation d'énergie d'un capteur lorsqu'il écoute et reçoit des données provenant d'autres nœuds du réseau. Ce modèle peut être exprimé de manière générale par la formule suivante :

$$E_{RX}(p) = p * E_{elec} \quad (5.2)$$

où $E_{RX}(p)$ correspond à la consommation d'énergie totale d'un message de p bits.

5.3.3 Paramètres de simulation

Après cette intégration de notre solution et aussi de la solution de référence, nous avons mené plusieurs expériences pour obtenir les résultats souhaités. Les paramètres de simulation utilisés sont résumés dans le tableau 5.1.

TABLE 5.1 – Paramètres de simulation.

Paramètre	Valeur
Dimensions du terrain (L×L)	200×200 m^2
Nombre de puits	1
Porté de communication	50 m
Vitesse du puits	10 m/s
Énergie résiduelle initiale	0.2 J
E_{seuil}	20%
Temps de pause du puits	600 secondes
Durée de simulation	4 heures
Nombre de noeuds sources	50
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{mp}	0.0013 pJ/bit/ m^4
E_{Fs}	10 pJ/bit/ m^2

5.3.4 Métriques de comparaison

La comparaison entre notre protocole EMSPU et la solution de référence est effectuée en se basant sur les quatre métriques suivantes :

- **Énergie totale consommée** : représente la quantité d'énergie consommée par l'ensemble des noeuds capteurs du réseau durant toute la durée de simulation.
- **Durée de vie du réseau** : elle se définit comme le temps écoulé depuis l'établissement du réseau jusqu'à ce que le premier nœud capteur ait totalement épuisé son énergie. C'est l'une des diverses définitions possibles de la durée de vie du réseau pour les RCSF.
- **Charge due aux messages de contrôle**¹ : cette charge représente le nombre de transmissions de messages de contrôle effectuées par les divers nœuds du réseau.
- **Taux de livraison des données**² : correspond au nombre total des messages données reçus par le puits sur le nombre total des messages émis par les nœuds sources.

1. Control overhead.

2. Data delivery ratio.

5.4 Résultats et discussion

Dans cette section, nous présenterons les résultats obtenus à partir des différentes simulations réalisées, accompagnés des discussions nécessaires. La figure 5.1 illustre un instantané extrait de NetAnim qui offre un aperçu de l'organisation de notre réseau simulé après l'application de notre solution EMSPU.

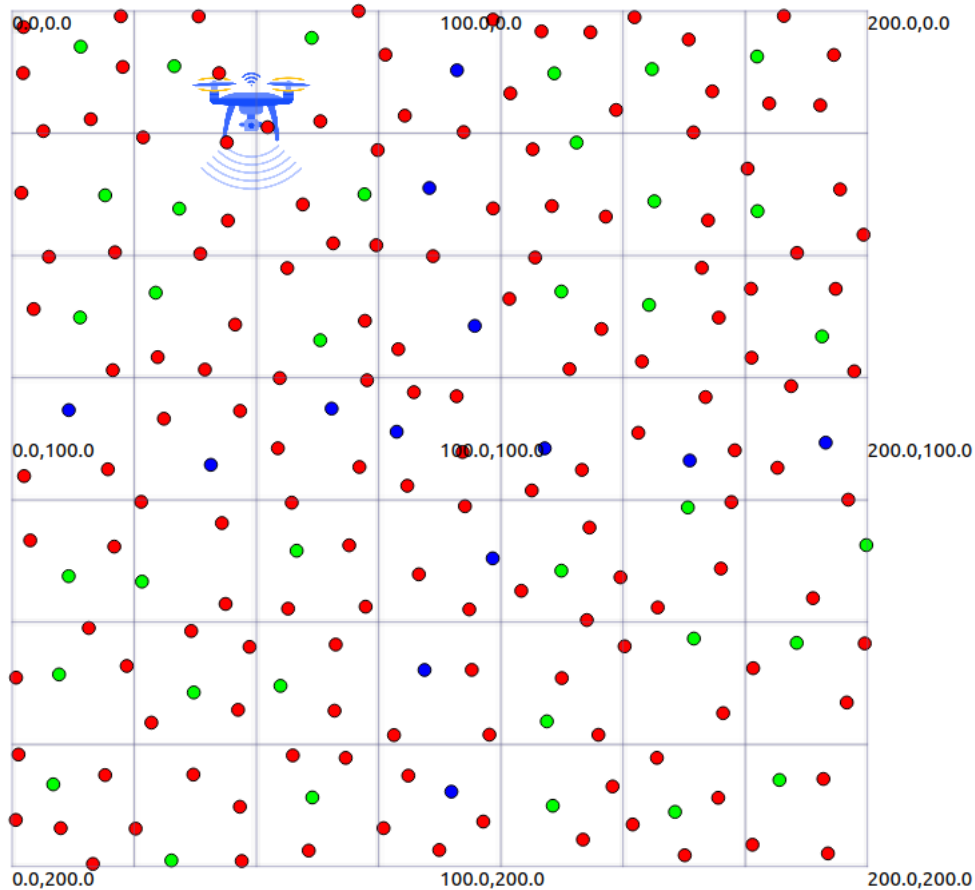


FIGURE 5.1 – Instantanés de NetAnim présentant notre réseau simulé avec des nœuds verts comme chefs de cluster (CH), des nœuds bleus en tant que CH et aussi nœuds responsables de la sauvegarde de la position du puits, et des nœuds rouges comme membres du cluster.

5.4.1 Énergie totale consommée

Dans la comparaison de l'énergie totale consommée en fonction du nombre de nœuds capteurs, représentée dans la figure 5.2, EMSPU et le protocole de référence démontrent des comportements distincts. Notre solution parvient à maintenir une consommation d'énergie nettement inférieure, même avec l'augmentation du nombre de nœuds capteurs. Par exemple, avec 100 nœuds capteurs, EMSPU consomme environ 9.59 J d'énergie, tandis que le protocole de référence en consomme 20 J ce qui donne un gain de 52.05%. Cette différence s'accroît avec

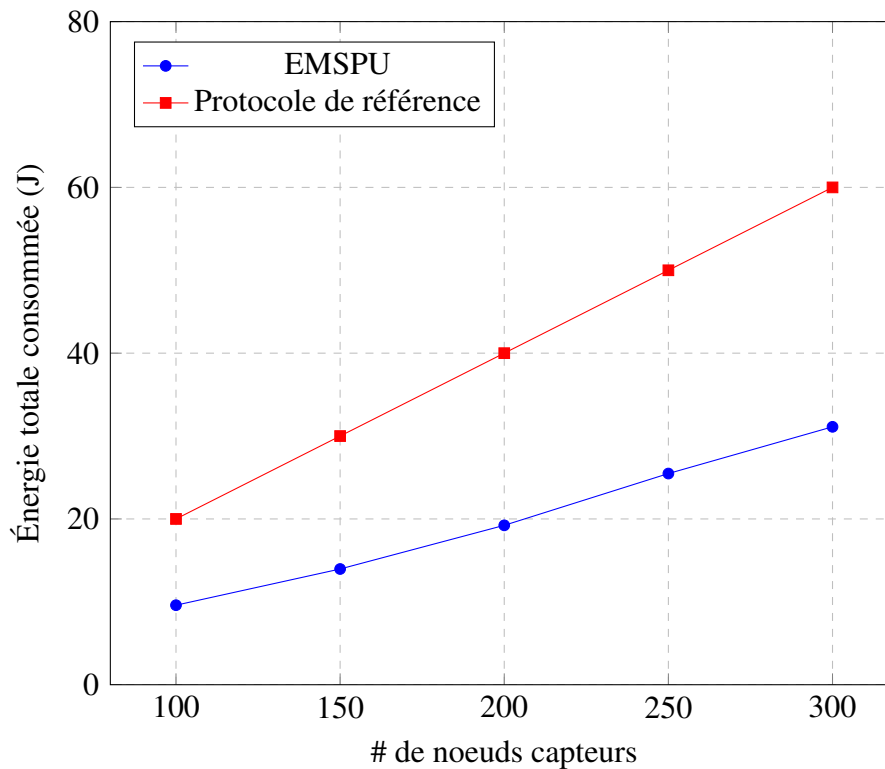


FIGURE 5.2 – Énergie totale consommée en fonction du nombre de noeuds capteurs.

l'augmentation du nombre de nœuds, atteignant environ 31.11 J pour EMSPU et 60 J pour le protocole de référence avec 300 nœuds capteurs.

La principale raison de cette disparité et comme le montre la figure 5.4, est le nombre élevé de messages de contrôle utilisés par la solution de référence pour demander la position actuelle du puits, comparé à notre solution. Cette dernière optimise l'utilisation des ressources en sélectionnant soigneusement un sous-groupe de nœuds responsables du maintien continu de la position du puits. Aucun message de contrôle n'est diffusé sur l'ensemble du réseau ; seuls les CH des cellules situées sur la ligne et la colonne centrales sont impliqués dans cette diffusion. En revanche, le protocole de référence, caractérisé par la diffusion généralisée des requêtes de demande de position, génère une consommation d'énergie plus élevée, ce qui se traduit par une performance énergétique inférieure. Ainsi, cette comparaison met en évidence l'efficacité de notre solution dans la gestion des ressources énergétiques, ce qui contribue à une utilisation plus efficace de l'énergie et à une amélioration de la durée de vie du réseau de capteurs sans fil comme nous allons voir dans la section suivante.

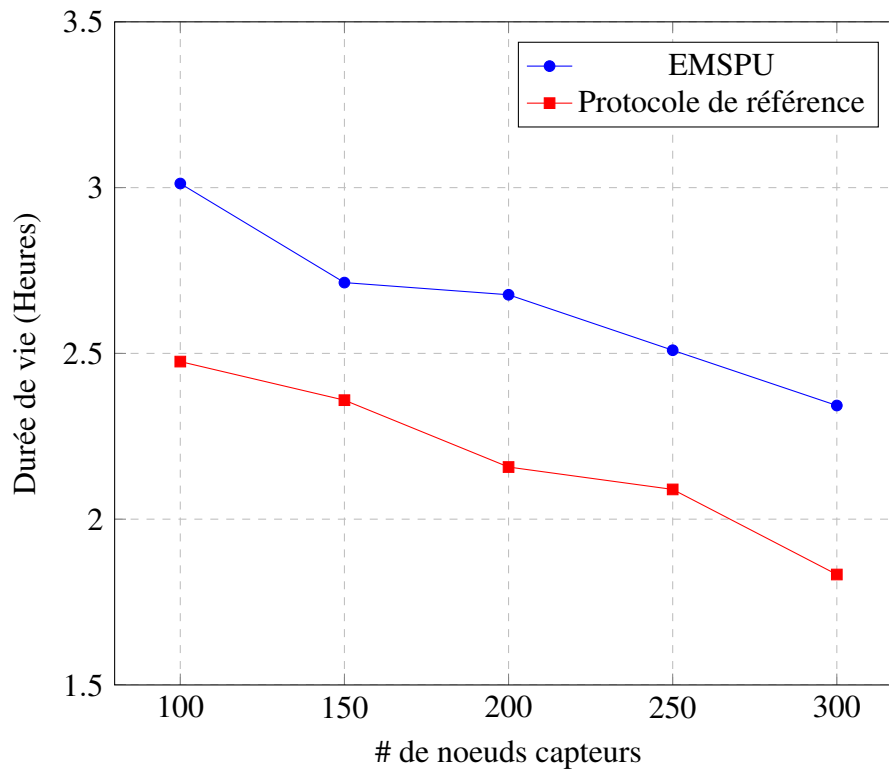


FIGURE 5.3 – Durée de vie du réseau jusqu’à ce que le premier nœud capteur ait totalement épuisé son énergie.

5.4.2 Durée de vie du réseau

Dans la comparaison de la durée de vie du réseau jusqu’à ce que le premier nœud capteur ait totalement épuisé son énergie, illustrée dans la figure 5.3, EMSPU et le protocole de référence révèlent des performances divergentes. Notre solution affiche une durée de vie plus longue du réseau, même lorsque le nombre de nœuds capteurs augmente. Par exemple, avec 100 nœuds capteurs, la durée de vie estimée est d’environ 3.01 heures pour l’EMSPU, tandis qu’elle est d’environ 2.48 heures pour le protocole de référence. Cette différence se maintient avec l’augmentation du nombre de nœuds, atteignant environ 2.34 heures pour l’EMSPU et 1.83 heures pour le protocole de référence avec 300 nœuds capteurs.

Cette observation est tout à fait logique compte tenu de la consommation énergétique élevée causée par la solution de référence.

5.4.3 Charge due aux messages de contrôle

L’analyse du nombre de transmissions des messages de contrôle, comme indiqué dans la figure 5.4, est cruciale pour évaluer l’efficacité opérationnelle des protocoles dans un RCSF.

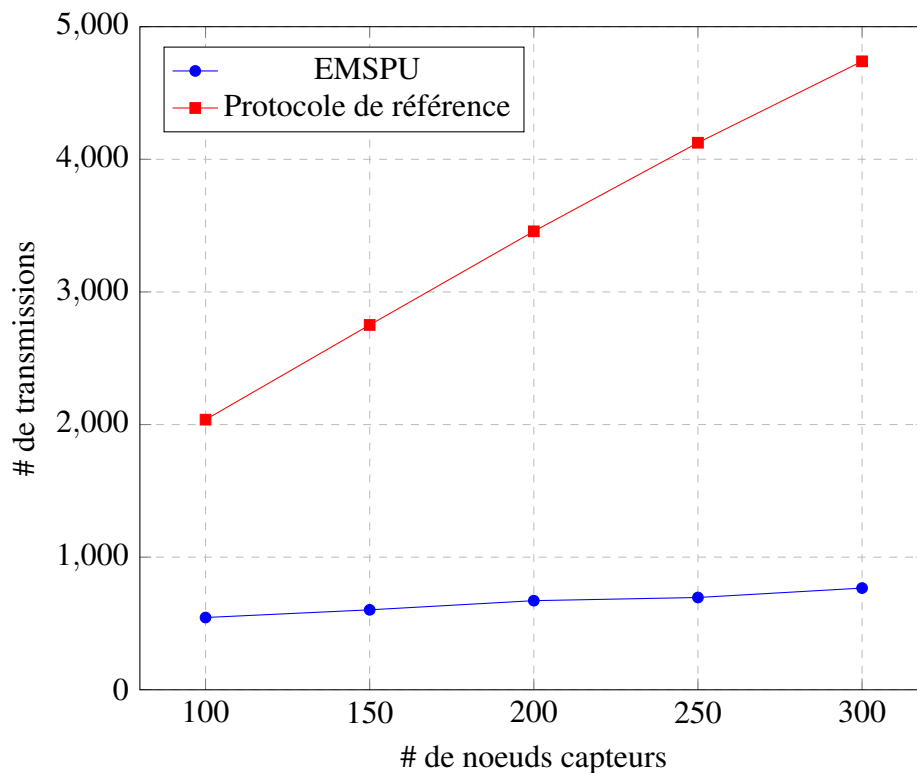


FIGURE 5.4 – Nombre total de transmissions de messages de contrôle en fonction du nombre de noeuds capteurs.

Avec EMSPU, le nombre de transmissions de ces messages connaît une augmentation peu importante lorsque le nombre de nœuds capteurs augmente, illustrant une gestion efficace des ressources du réseau. Par exemple, avec seulement 100 nœuds capteurs, environ 545 transmissions sont nécessaires, comparé à environ 767 transmissions avec 300 nœuds capteurs. En revanche, le protocole de référence montre une augmentation significative de ce nombre avec l'augmentation du nombre de nœuds, atteignant environ 2037 transmissions avec 100 nœuds capteurs et environ 4739 transmissions avec 300 nœuds capteurs.

5.4.4 Taux de livraison des données

En ce qui concerne le taux de livraison des données, tel qu'illustré dans la figure 5.5, les deux protocoles présentent des performances comparables. En fait, ce taux tourne autour des 80% dans les deux cas et n'arrive jamais à 100%. Cela est dû principalement à la mobilité continue du puits qui peut rater quelques messages de données lors de ses déplacements.

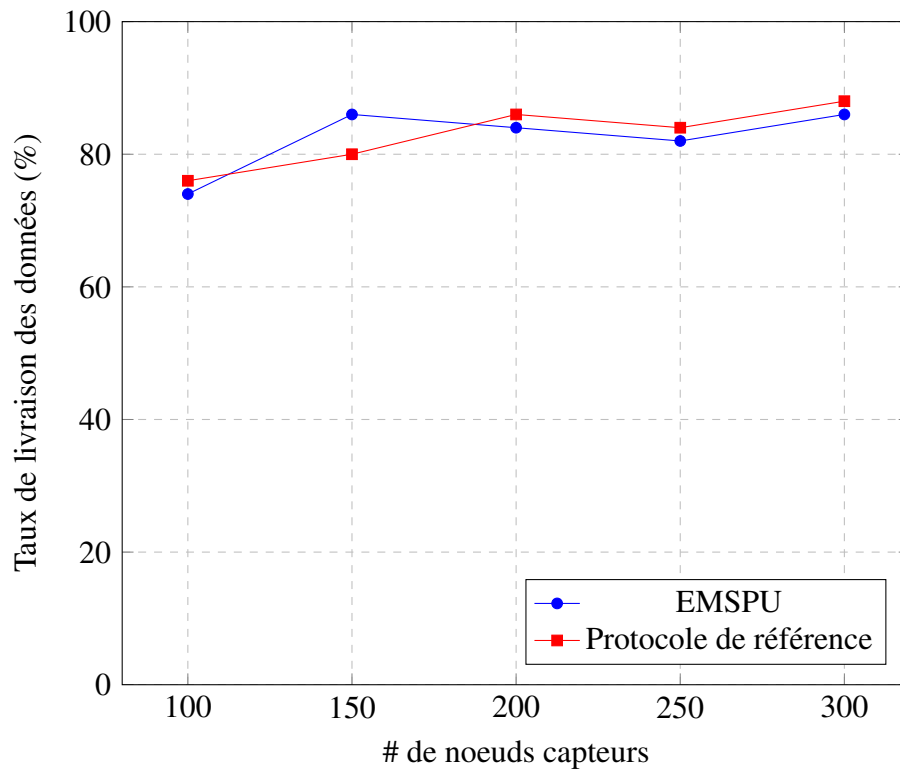


FIGURE 5.5 – Taux de livraison des données en fonction du nombre de noeuds capteurs.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré le processus de validation de notre protocole EMSPU par le biais de simulations réalisées avec le simulateur NS-3. Après avoir brièvement présenté ce simulateur et détaillé notre méthodologie de simulation ainsi que ses paramètres spécifiques, nous avons exposé les résultats obtenus et les discussions qui en découlent. Ces résultats ont mis en lumière la performance de notre proposition comparée à la solution de référence et qui confirme la robustesse et l'efficacité de notre solution.

Chapitre 6

Conclusion générale

6.1 Contributions

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au problème de la dissémination efficace et continue de la position la plus récente du puits en mouvement aléatoire dans un RCSF. Pour répondre à cette problématique, nous avons proposé notre propre solution, nommée EMSPU. En particulier, nous avons développé une méthode pour déterminer les nœuds du réseau chargés de maintenir à jour la position courante du puits. Cette méthode repose sur une approche utilisant une grille virtuelle, divisant le réseau en plusieurs cellules et facilitant ainsi la gestion grâce à une clusterisation.

Nous avons également défini un ensemble de règles nécessaires pour mettre à jour la position du puits. Ces mêmes règles sont utilisées lorsque qu'un nœud capteur demande la position courante du puits avant de pouvoir envoyer ses propres données.

Pour valider notre solution, nous avons effectué des simulations en l'intégrant dans le simulateur NS-3, en la comparant à une solution de référence. Diverses expérimentations ont été menées, produisant des résultats très positifs.

6.2 Critique du travail

Même si notre solution proposée répond aux principales questions soulevées par la problématique abordée dans ce travail, plusieurs défis critiques restent à surmonter. Tout d'abord, la

récupération de positions obsolètes du puits constitue une préoccupation majeure. Si un nœud capteur obtient une position périmée du puits, cela peut entraîner des erreurs de routage et une consommation inutile d'énergie lors des tentatives de communication vers une destination incorrecte.

En outre, la minimisation du coût énergétique ne doit pas se faire au détriment d'une surcharge du réseau en termes de nombre de messages de contrôle échangés. Une surabondance de messages de contrôle peut entraîner une augmentation importante de la consommation d'énergie globale, annulant ainsi les bénéfices de l'optimisation énergétique.

6.3 Travaux futurs et perspectives

Pour relever les défis identifiés et explorer de nouvelles perspectives dans la problématique abordée dans ce travail, plusieurs pistes de recherches futures peuvent être envisagées.

Tout d'abord, une avenue prometteuse consiste à développer d'autres solutions à ce problème de sauvegarde et de dissémination de la position la plus récente du puits en cherchant une sélection plus optimisée des nœuds responsables de la sauvegarde de cette position et aussi en minimisant la charge qui peut être causée par sa mise à jour sur ces nœuds.

De plus, l'exploration de protocoles de communication plus efficaces prenant en compte les contraintes énergétiques demeure essentielle pour assurer une communication fiable et efficiente.

Par ailleurs, l'intégration de techniques d'intelligence artificielle pourrait offrir de nouvelles opportunités pour la conception de stratégies d'acheminement et de gestion de l'énergie plus intelligentes et adaptatives, optimisant ainsi les performances du réseau dans des environnements changeants.

Références

- [1] B. M. B. épouse HABRI, “Routage intelligent dans les réseaux de capteurs à grande échelle,” Ph.D. dissertation, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN, 2020.
- [2] N. Miloud, “Auto-adaptation dans les rcsf hétérogènes pour des e-applications,” Ph.D. dissertation, Université de Batna 2, Département d’Informatique, 2018.
- [3] C. T. KONE, “Conception de l’architecture d’un réseau de capteurs sans fil de grande dimension,” Ph.D. dissertation, l’Université Henri Poincaré, Nancy I, 29 Mar 2018.
- [4] R. Bilel, “Exploitation de l’hétérogénéité des réseaux de capteurs et d’actionneurs dans la conception des protocoles d’auto-organisation et de routage,” Ph.D. dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2012.
- [5] N. Sghaier, “Techniques de conservation de l’énergie dans les réseaux de capteurs mobiles : découverte de voisinage et routage,” Ph.D. dissertation, UNIVERSITÉ PARIS-EST (MSTIC), 2013.
- [6] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, “Routing techniques in wireless sensor networks,” Ph.D. dissertation, Iowa State University, Ames, Iowa, 2003.
- [7] Wei Wang, V. Srinivasan, and Kee-Chaing Chua, “Extending the Lifetime of Wireless Sensor Networks Through Mobile Relays,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 5, pp. 1108–1120, Oct. 2008. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4469911/>
- [8] A. Tuysuz Erman, “Multi-sink mobile wireless sensor networks,” PhD, University of Twente, Enschede, The Netherlands, Sep. 2011, iSBN : 9789036532518. [Online].

Available : <http://purl.org/utwente/doi/10.3990/1.9789036532518>

- [9] S. Jain, R. K. Verma, K. K. Pattanaik, and A. Shukla, “A survey on event-driven and query-driven hierarchical routing protocols for mobile sink-based wireless sensor networks,” *The Journal of Supercomputing*, vol. 78, no. 9, pp. 11 492–11 538, Jun. 2022. [Online]. Available : <https://link.springer.com/10.1007/s11227-022-04327-4>
- [10] M. F. Suleiman and U. Adeel, “Energy Efficient Data Collection Using Predefined Path Constrained Mobility for Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks,” in *2023 33rd International Telecommunication Networks and Applications Conference*. Melbourne, Australia : IEEE, Nov. 2023, pp. 1–6. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10368566/>
- [11] A. Caruso, S. Chessa, S. Escolar, J. Barba, and J. C. Lopez, “Collection of Data With Drones in Precision Agriculture : Analytical Model and LoRa Case Study,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 22, pp. 16 692–16 704, Nov. 2021. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9416287/>
- [12] V. Rajagopal, B. Velusamy, M. Krishnan, and S. Rathinasamy, “Energy efficient data gathering using mobile sink in IoT for reliable irrigation,” *Sustainable Computing : Informatics and Systems*, vol. 40, p. 100916, Dec. 2023. [Online]. Available : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210537923000719>
- [13] S. Singh, A. S. Nandan, A. Malik, N. Kumar, and A. Barnawi, “An Energy-Efficient Modified Metaheuristic Inspired Algorithm for Disaster Management System Using WSNs,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 13, pp. 15 398–15 408, Jul. 2021. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9424024/>
- [14] C. Stais, G. Xylomenos, and G. F. Marias, “Sink controlled reliable transport for disaster recovery,” in *Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. Rhodes Greece : ACM, May 2014, pp. 1–4. [Online]. Available : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2674396.2674465>
- [15] R. Vera-Amaro, M. E. Rivero-Ángeles, and A. Luviano-Juárez, “Data Collection Schemes for Animal Monitoring Using WSNs-Assisted by UAVs : WSNs-Oriented or UAV-Oriented,” *Sensors*, vol. 20, no. 1, p. 262, Jan. 2020. [Online]. Available :

<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/1/262>

- [16] R. Wohlers, N. Trigoni, R. Zhang, and S. Ellwood, “TwinRoute : Energy-Efficient Data Collection in Fixed Sensor Networks with Mobile Sinks,” in *2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management : Systems, Services and Middleware*. Taipei, Taiwan : IEEE, 2009, pp. 192–201. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5088934/>
- [17] S. K. Jain, V. M, and N. Shrivastava, “A Query driven Backbone based Routing for Mobile Sink based Wireless Sensor Networks,” in *2022 IEEE 11th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*. Indore, India : IEEE, Apr. 2022, pp. 521–526. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9787560/>
- [18] A. W. Khan, A. H. Abdullah, M. A. Razzaque, and J. I. Bangash, “VGDR : A Virtual Grid-Based Dynamic Routes Adjustment Scheme for Mobile Sink-Based Wireless Sensor Networks,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 526–534, Jan. 2015. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6876134/>
- [19] S. K. Chaurasiya, A. Biswas, and R. Banerjee, “An Energy-Efficient Clustering with Mobile Sink and Rendezvous Nodes for Data Collection in IoT-based Wireless Sensor Networks,” in *2022 International Interdisciplinary Conference on Mathematics, Engineering and Science (MESIICON)*. Durgapur, India : IEEE, Nov. 2022, pp. 1–5. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10093261/>
- [20] A. Mehto, R. K. Verma, and S. Jain, “Efficient Trajectory Planning and Route Adjustment Strategy for Mobile Sink in WSN-assisted IoT,” in *2022 IEEE Region 10 Symposium (TENSymp)*. Mumbai, India : IEEE, Jul. 2022, pp. 1–6. [Online]. Available : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9864434/>
- [21] R. K. Verma and S. Jain, “Energy and delay efficient data acquisition in wireless sensor networks by selecting optimal visiting points for mobile sink,” *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 14, no. 9, pp. 11 671–11 684, Sep. 2023. [Online]. Available : <https://link.springer.com/10.1007/s12652-022-03729-9>
- [22] Ns-3, site officiel. [Online]. Available : <https://www.nsnam.org/docs/tutorial/html>

- [23] H. Boucenna and M. A. Bouaziz, “Vers une intégration de la technologie SDN dans les réseaux de capteurs sans fil.”
- [24] A. Mehto, S. Tapaswi, and K. K. Pattanaik, “Virtual grid-based rendezvous point and sojourn location selection for energy and delay efficient data acquisition in wireless sensor networks with mobile sink,” *Wireless Networks*, 2020. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02293-4>
- [25] S. Khaoula and B. Nesrine, “Optimisation de la consommation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil avec un puits mobile.”