

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

Routage en temps réel dans les réseaux de capteurs sans fil  
avec prolongation de la durée de vie du réseau dans le cadre de  
l'Internet des objets.

*Présenté par :*

Bouthaina DEFFAF

Nadjeh CHAOUA

*Soutenu publiquement le : 20/06/2024*

*Devant le jury composé de :*

**Présidente :** Mme. Sara BOUTOUHAMI

**Examinatrice :** Mme. Ramla BELALTA

**Encadrant :** M. Nadjib BENAOUA

**2023/2024**

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes parents, dont la guidance précieuse et les sacrifices infinis ont pavé ma route vers le succès.*

*À mes frères et sœurs, ainsi qu'à toute ma famille et mes amis, pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement tout au long de ce parcours.*

***Bouthaina DEFFAF***

*Je dédie ce modeste travail avec une profonde gratitude et un amour infini*

*À mes chers parents, qui ont toujours été mes piliers, ma source de force et d'inspiration. Leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible ont été le phare illuminant mon chemin, guidant chacun de mes pas vers le succès. Cette réussite est autant la leur que la mienne, car c'est grâce à eux que j'ai pu la réaliser.*

*À mes sœurs et mes frères bien-aimés, compagnons de chaque étape de ma vie. Leur amour, leur encouragement, leur soutien et leurs conseils ont été une lumière dans les moments sombres et un moteur dans les instants de découragement, me poussant à continuer et à poursuivre mes rêves.*

*À mes chers amis et à toutes les personnes qui ont été présentes de près ou de loin, avec leurs mots ou leurs gestes bienveillants, renforçant ma détermination et me donnant la force de persévérer. Je leur suis profondément reconnaissante pour leur soutien inestimable et leur sincère amour.*

***Nadjeh CHAOUA***

# Remerciement

*Nous tenons à remercier Allah, le Tout-Puissant, source de toute bénédiction dans nos vies, pour nous avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.*

*Nous tenons à exprimer tous nos sincères remerciements à notre encadrant, M. Nadjib BENAOUA, sans qui nous n'aurions jamais pu mener à bien ce travail. Son expertise, ses précieux conseils, son engagement infailible et son soutien indéfectible ont été des piliers indispensables pour la réalisation de ce mémoire. Sa confiance en nos capacités et ses encouragements permanents ont été une source d'inspiration qui nous a poussés à donner le meilleur de nous-mêmes.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude aux membres du jury pour leur temps et leurs retours constructifs lors de l'évaluation de ce travail.*

*Un grand merci à nos enseignants du département informatique pour leur dévouement, leur expertise et leur contribution à notre formation, ainsi qu'à nos collègues pour leur collaboration, leur encouragement et les échanges enrichissants tout au long de ce parcours académique.*

*Nous remercions du fond du cœur nos familles pour leur soutien et leurs encouragements à surmonter tous les défis et à atteindre les sommets du succès. Et nos amis et toutes les personnes qui ont apporté leur aide et leur soutien qui a contribué à la réussite de ce travail de près ou de loin.*

# Résumé

Dans ce travail, nous nous intéressons au routage en temps réel dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) et à la prolongation de leur durée de vie opérationnelle. Plus précisément, nous cherchons à trouver une solution pouvant minimiser la consommation d'énergie dans les RCSF ainsi que les délais de collection de données. Pour répondre à cette problématique, nous avons proposé un nouveau protocole que nous avons baptisé ERRMS, acronyme de « Energy-efficient Real-time Routing Mobile-Sink based ». ERRMS est basé sur un autre protocole appelé EDEDA qui repose sur l'approche de la mobilité de puits à trajectoire fixe. Nous avons travaillé sur des scénarios applicatifs avec une collection périodique de données et apporté des améliorations dans la sélection des points de rendez-vous (PR), afin de minimiser leur nombre. Cela réduit le temps du trajet nécessaire que le puits mobile doit parcourir pour collecter les données à partir de tous les noeuds capteurs du réseau, réduisant ainsi le délai de la collecte pour une communication en temps réel. Notre solution a été validée par simulation à l'aide du simulateur NS-3. Notre protocole avec EDEDA ont les deux été intégrés dans le simulateur. Les résultats obtenus après les différentes expériences réalisées sont présentés sous forme de courbes et d'instantanés, montrant des résultats extrêmement positifs.

**Mots-clés :** RCSF, IdO, Efficacité énergétique, Routage en temps réel, Durée de vie du réseau, Puits mobile, NS-3.

# Abstract

In this work, we focus on real-time routing in Wireless Sensor Networks (WSN) and the Prolongation of their operational lifetime. Specifically, we aim to find a solution that minimizes energy consumption in WSNs as well as data collection delays. To address this issue, we proposed a new protocol named ERRMS, which stands for « Energy-efficient Real-time Routing Mobile-Sink based». ERRMS is based on another protocol called EDEDA, which relies on a fixed path mobile sink approach. We worked on application scenarios with periodic data collection and made improvements in the selection of rendezvous points (RP) to minimize their number. This reduces the travel time required for the mobile sink to collect data from all the sensor nodes in the network, thereby reducing the collection delay for real-time communication. Our solution was validated through simulation using the NS-3 simulator. Both our protocol and EDEDA were integrated into the simulator. The results obtained from various experiments are presented in the form of graphs and snapshots, showing extremely positive outcomes.

**Keywords :** WSN, IoT, Energy efficiency, Real-time routing, Network lifetime, Mobile sink, NS-3

## ملخص

في هذا العمل، نركز على التوجيه في الوقت الفعلي في شبكات الاستشعار اللاسلكية (RCSF) و إطالة عمرها العملي. وبالتحديد، نسعى إلى إيجاد حل يمكنه تقليل استهلاك الطاقة في شبكات الاستشعار اللاسلكية وكذلك المدة الزمنية لجمع البيانات. لمعالجة هذه المشكلة، اقترحنا بروتوكولا جديدا أطلقنا عليه اسم ERRMS وهو اختصار لـ «Energy-efficient Real-time Routing Mobile-Sink based». يعتمد ERRMS على بروتوكول آخر يسمى EDEDA و الذي يعتمد على نهج حركة الجامع المتنقل وفقا لمسار ثابت. عملنا على سيناريوهات تطبيقية مع جمع البيانات بشكل دوري، و قمنا بتعديلات فيما يخص نقاط الالتقاء (PR) بهدف تقليل عددها. مما يقلل من الوقت اللازم الذي يستغرقه الجامع المتنقل لجمع البيانات من جميع العقد الاستشعارية في الشبكة، و بالتالي تقليل المدة الزمنية اللازمة لجمع البيانات من اجل ضمان اتصالات في وقت الفعلي. تم التحقق من الحل الذي قمنا باقتراحه من خلال المحاكاة باستخدام المحاكى NS-3. تم دمج كل من بروتوكولنا و EDEDA في المحاكى. تم تقديم النتائج التي تم الحصول عليها بعد التجارب المختلفة في شكل رسومات ولقطات، مما يظهر نتائج إيجابية للغاية.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية، إنترنت الأشياء، كفاءة الطاقة، التوجيه في الوقت الفعلي، عمر الشبكة، الجامع المتنقل، NS-3.

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>ملخص</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>xiii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xiv</b>
<b>Liste des algorithmes</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte . . . . .	1
1.2 Problématique . . . . .	2
1.3 Contribution . . . . .	3
1.4 Méthodologie et résultats . . . . .	3
1.5 Structure du rapport . . . . .	4
<b>2 Généralités sur l'internet des objets et les réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>5</b>
2.1 Introduction . . . . .	5
2.2 Internet des objets . . . . .	6
2.2.1 Définition . . . . .	6
2.2.2 Processus de fonctionnement de l'IdO . . . . .	6
2.3 Réseaux de capteurs sans fil . . . . .	8

2.3.1	Définition . . . . .	8
2.3.2	Architecture du nœud capteur . . . . .	9
2.4	Rôle des RCSF dans l'IdO . . . . .	10
2.5	Modes de communication dans les RCSF . . . . .	11
2.5.1	Communication événementielle . . . . .	12
2.5.2	Communication périodique . . . . .	12
2.5.3	Communication à la demande . . . . .	12
2.6	Contraintes de conception des RCSF . . . . .	12
2.7	Consommation d'énergie dans les RCSF . . . . .	14
2.7.1	Formes de consommation d'énergie par un nœud capteur . . . . .	15
2.7.2	Sources de surconsommation d'énergie . . . . .	16
2.7.3	Techniques de conservation d'énergie . . . . .	16
2.7.3.1	Duty-cycling . . . . .	17
2.7.3.2	Orientée données . . . . .	18
2.7.3.3	Basées sur la mobilité . . . . .	18
2.8	Stratégies de routage dans les RCSF . . . . .	19
2.8.1	Basé sur le modèle de communication . . . . .	20
2.8.2	Basée sur la structure de réseau . . . . .	21
2.8.3	Basée sur la topologie . . . . .	22
2.8.4	Basé sur le routage fiable . . . . .	23
2.9	Domaines d'application de RCSF . . . . .	24
2.9.1	Applications militaires . . . . .	24
2.9.2	Applications médicales . . . . .	24
2.9.3	Applications de surveillance . . . . .	25
2.9.4	Applications environnementales . . . . .	25
2.9.5	Applications agricoles . . . . .	26
2.9.6	Applications domotiques . . . . .	26
2.10	Conclusion . . . . .	26
<b>3</b>	<b>État de l'art sur le routage en temps réel dans les RCSF</b>	<b>28</b>
3.1	Introduction . . . . .	28
3.2	Aperçu sur la qualité de service . . . . .	29
3.2.1	Définition . . . . .	29

3.2.2	Métriques . . . . .	29
3.2.3	Solutions de contrôle de la QoS dans les RCSF . . . . .	31
3.2.3.1	Solutions MAC . . . . .	31
3.2.3.2	Routage . . . . .	31
3.2.3.3	Traitement des données . . . . .	32
3.2.3.4	Cross-layer . . . . .	32
3.3	Communication en temps réel dans les RCSF . . . . .	33
3.3.1	Présentation . . . . .	33
3.3.2	Modèles de communication . . . . .	33
3.3.2.1	Temps réel hard . . . . .	34
3.3.2.2	Temps réel soft . . . . .	35
3.3.2.3	Temps réel firm . . . . .	36
3.3.3	Constituants de latence de communication . . . . .	37
3.3.3.1	Délai de traitement . . . . .	37
3.3.3.2	Délai d'attente . . . . .	38
3.3.3.3	Délai de transmission . . . . .	38
3.3.3.4	Délai de propagation . . . . .	38
3.3.4	Exemples de scénarios applicatifs . . . . .	39
3.3.4.1	La surveillance de la santé . . . . .	39
3.3.4.2	Les systèmes de contrôle automobile . . . . .	40
3.3.4.3	La surveillance environnementale . . . . .	40
3.3.4.4	Les villes intelligentes . . . . .	40
3.4	Travaux connexes au routage en temps réel dans les RCSF . . . . .	41
3.4.1	Travaux considérés . . . . .	41
3.4.2	Discussion . . . . .	46
3.5	Conclusion . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Contribution</b>	<b>51</b>
4.1	Introduction . . . . .	51
4.2	Description du problème . . . . .	51
4.3	Modèle réseau . . . . .	52
4.4	Vue d'ensemble de notre protocole . . . . .	53
4.5	Structures de données utilisées . . . . .	54

4.6	Liste et formats des messages utilisés . . . . .	55
4.7	Description détaillée de notre protocole . . . . .	57
4.7.1	Construction de la grille . . . . .	57
4.7.2	Élection du CH . . . . .	59
4.7.3	Identification des PR . . . . .	61
4.7.4	Planification du trajet et collection des données . . . . .	63
4.8	Conclusion . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Validation</b>	<b>67</b>
5.1	Introduction . . . . .	67
5.2	Simulateur NS-3 . . . . .	67
5.3	Méthodologie . . . . .	68
5.3.1	Paramètres de simulation . . . . .	69
5.3.2	Modèle énergétique . . . . .	69
5.3.3	Métriques de comparaison . . . . .	70
5.3.3.1	Énergie totale consommée . . . . .	70
5.3.3.2	Durée de vie du réseau . . . . .	71
5.3.3.3	Délai de collection de données . . . . .	71
5.4	Résultats et discussion . . . . .	71
5.4.1	Énergie totale consommée . . . . .	72
5.4.2	Durée de vie du réseau . . . . .	75
5.4.3	Délai de collection de données . . . . .	76
5.5	Conclusion . . . . .	77
<b>6</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>78</b>
6.1	Contributions . . . . .	78
6.2	Critique du travail . . . . .	79
6.3	Travaux futurs et perspectives . . . . .	80
	<b>Références</b>	<b>80</b>

# Liste des abréviations

**CAN** Convertisseur Analogique-Numérique (Analog-to-Digital Converter: ADC).

**CH** Cluster-Head.

**DADF** Delay-Aware Data Fusion.

**DCEMRA** Delay Constrained Energy-efficient Multi-hop Routing Algorithm.

**DEDA** Delay-bounded and Energy-efficient Data Aggregation.

**DFS** Depth First Search.

**DGM2S** Data Gathering with Multi-interface Mobile Sink.

**DPD** Delayed Packet Dropping.

**EDEDA** Energy and Delay Efficient Data Acquisition.

**EETC** Energy Efficient Tree-Clustering.

**ERRMS** Energy-efficient Real-time Routing Mobile-Sink based.

**FCR** Firefly with Cyclic Randomization.

**FNS** Forwarding Node Selection.

**GCH** Grid Cell Head.

**HDF** Hierarchical Data Fusion.

**I-EDF** Implicit Earliest Deadline First.

**IdO** Internet des Objets.

**IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers.

**LMST** Local Minimum Spanning Tree.

**MAC** Medium Access Control.

**NEB** Node Energy Balancing.

**NS-3** Network Simulator version 3.

**NST** Neighborhood State Index.

**OGENCL** Optimal Generation of Clusters.

**OSI** Open Systems Interconnection.

**PR** Points de Rendez-vous.

**PRI** Potential Relay Information.

**QoS** Qualité de Service.

**QR** Quadruple Résonance.

**RCSF** Réseaux de Capteurs Sans Fil.

**RFID** Radio Frequency Identification.

**RTH-MAC** Real-Time Hybrid MAC.

**SAS-TDMA** Source Aware Scheduling-Time Division Multiple Access.

**SB** Station de Base.

**SNGF** Stateless Non-deterministic Geographic Forwarding algorithm.

**SRTST** Soft Real-Time Shared Time slot.

**TCP** Transmission Control Protocol.

**TDMA** Time Division Multiple Access.

**UDG** Unit Disk Graph.

**UIT** Union Internationale des Télécommunications.

**WBAN** Wireless Body Area Networks.

# Liste des figures

2.1	Principe de fonctionnement du IdO. . . . .	7
2.2	Exemple d'un réseau de capteur sans fil. . . . .	9
2.3	Architecture de base d'un noeud capteur. . . . .	9
2.4	Modes de communication dans les RCSF. . . . .	11
2.5	Consommation d'énergie par différentes unités d'un noeud capteur. . . . .	15
2.6	Techniques de conservation d'énergie. . . . .	17
2.7	Classification des protocoles de routage. . . . .	20
3.1	Modèles de communication en temps réel . . . . .	34
4.1	Principe de construction de la grille. . . . .	58
4.2	La détermination du cluster-head. . . . .	60
4.3	Identification des points de rendez-vous (PR). . . . .	62
4.4	Graphe connexe des PR avec une grille de $12 \times 12$ . . . . .	64
4.5	La planification du trajets et collection des données. . . . .	65
5.1	Consommation totale d'énergie en fonction du nombre du noeuds capteurs . . . .	72
5.2	Instantanés de collection de données pour les protocoles EDEDA et ERRMS. Les nœuds rouges représentent les CH, tandis que les nœuds bleus sont des membres de cluster. Les différents carrés gris correspondent aux différents PR.	74
5.3	Durée de vie du réseau en fonction du nombre du noeud capteur . . . . .	75
5.4	Le délais de collection en fonction de L. . . . .	76

# Liste des tableaux

3.1	Résumé des protocoles de routage examinés. . . . .	47
3.2	Techniques de conservation d'énergie et solutions de la garantie de la QoS dans les solutions examinées. . . . .	48
4.1	Table des messages utilisés. . . . .	55
4.2	Table des symboles utilisés. . . . .	57
5.1	Paramètres de simulation. . . . .	69
5.2	Le nombre de PR en fonction de $\alpha$ pour les protocoles EDEDA et ERRMS. . .	76

# Liste des algorithmes

1	Processus de construction de la grille . . . . .	59
2	Processus d'élection d'un cluster-head au sein d'une même cellule . . . . .	61
3	Processus d'identification des points de rendez-vous . . . . .	63
4	Processus de collection de données . . . . .	65

# Chapitre 1

## Introduction générale

### 1.1 Contexte

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) se trouvent au cœur de la recherche scientifique en raison de leur potentiel et de leurs multiples applications. Un RCSF est formé d'une multitude de nœuds capables de percevoir, traiter et communiquer des données entre eux via des liaisons sans fil. Ces nœuds, déployés dans des environnements spécifiques, collectent des informations physiques telles que la température, l'humidité ou les vibrations. Les données sont ensuite transmises d'un nœud à un autre, pour finalement converger vers un nœud puits, agissant comme la passerelle vers l'extérieur. Cependant, ces nœuds capteurs font face à une série de défis majeurs qui entravent leur efficacité et leur durabilité. Leurs capacités de traitement et de stockage sont souvent limitées en raison de contraintes matérielles et budgétaires, ce qui restreint la complexité des calculs et la taille des données pouvant être traitées localement. De plus, l'équilibrage de la charge représente un défi, car certains nœuds peuvent être soumis à des charges de travail plus élevées en raison de leur position géographique ou de la nature des données collectées. Cela peut entraîner une usure prématurée des batteries, qui doivent être gérées de manière efficace pour maximiser la durée de vie opérationnelle du réseau. Ainsi, le développement d'algorithmes et de protocoles adaptés revêt une importance capitale pour garantir le bon fonctionnement et la durabilité des RCSF, surtout dans le contexte de l'internet des objets (IdO), où ces réseaux constituent des infrastructures critiques jouant un rôle essentiel dans la collecte, le traitement et la transmission des données environnementales, et facilitant la connec-

tivité intelligente entre les objets physiques. Leur contribution est indispensable pour créer un écosystème interconnecté où les dispositifs interagissent de manière efficace pour améliorer les processus et optimiser les performances, façonnant ainsi un monde plus intelligent et plus efficace.

## 1.2 Problématique

Au sein du domaine de la recherche sur les RCSF et leur intégration dans l'IdO, le développement des solutions de routage en temps réel qui garantissent une efficacité énergétique optimale tout en assurant une durée de vie prolongée du réseau constitue un défi majeur qui suscite l'attention de nombreux chercheurs. La gestion efficace de l'énergie est au cœur de ce défi, étant donné que les capteurs sont souvent alimentés par des sources d'énergie limitées. De plus, le routage en temps réel pose des défis supplémentaires en termes de minimisation des délais de transmission, afin de garantir une réponse rapide aux événements détectés par les capteurs. Il est donc nécessaire de concevoir des algorithmes de routage efficaces capables d'acheminer les données de manière rapide et efficace tout en minimisant la consommation d'énergie, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie du réseau et à améliorer ses performances.

Dans ce travail, nous nous intéressons à des scénarios d'application impliquant une collecte périodique de données à partir de tous les nœuds du réseau. Récemment, la collecte de telles données à l'aide d'un puits mobile, plutôt que de laisser ces nœuds capteurs envoyer leurs données à un puits statique, a émergé comme une solution efficace qui peut considérablement réduire la consommation d'énergie associée à cette collecte. Deux solutions peuvent être envisagées pour mener à bien cette collecte. La première consiste à faire en sorte que le puits mobile visite chaque nœud capteur du réseau. Dans ce cas, la durée de la collecte sera longue car la longueur du trajet devant être parcouru par le puits pour visiter tous les nœuds du réseau sera très importante. La deuxième solution consiste à choisir certains points du terrain de déploiement ou certains nœuds du réseau comme points de rendez-vous (PR) que le puits mobile doit visiter pour collecter les données des nœuds capteurs adjacents à ces points. Comparée à la première solution, la durée de la collecte sera moins longue, car le trajet du puits comprendra moins de points de visite.

Dans ce travail, nous nous concentrons sur cette deuxième solution de collecte par puits mo-

bile. En particulier, notre étude répond à la question suivante : comment déterminer le nombre minimal de PR permettant d'assurer une collecte économe en énergie, minimisant la consommation totale d'énergie et prolongeant ainsi la durée de vie du réseau, tout en garantissant une durée de collecte minimale pour assurer une réponse rapide aux événements détectés par les capteurs ?

### **1.3 Contribution**

Afin de répondre à la problématique que nous venons de mentionner, nous proposons un protocole de routage efficace en énergie, baptisé ERRMS (Energy-efficient Real-time Routing Mobile-Sink based). ERRMS est un protocole de routage en temps réel efficace en énergie basé sur la mobilité du puits, visant à prolonger la durée de vie du RCSF.

ERRMS repose sur plusieurs étapes clés pour atteindre nos objectifs. Tout d'abord, le réseau est divisé en clusters en fonction de la portée de communication des nœuds, réduisant ainsi les distances de transmission et la consommation d'énergie. Chaque cluster est dirigé par un cluster-head (CH), chargé de collecter et d'agrèger les données avant de les transmettre au puits mobile. L'élection périodique du CH, basée sur la distance séparant chaque membre du cluster du barycentre et sur leurs énergies résiduelles, permet de maintenir l'équilibre énergétique du réseau. Une fois les CH élus, des points de rendez-vous (PR) sont identifiés pour permettre au puits mobile de collecter des données de plusieurs clusters en un seul saut, réduisant ainsi les distances physiques et les délais de transmission. Enfin, le puits mobile parcourt le réseau selon un chemin prédéterminé, collectant les données des PR avant de les transmettre à la station de base. ERRMS vise ainsi à garantir un routage en temps réel efficace en énergie, contribuant à prolonger la durée de vie du réseau tout en optimisant les performances de transmission dans le cadre de l'internet des objets.

### **1.4 Méthodologie et résultats**

Dans le but de valider notre proposition et de démontrer sa capacité à prolonger la durée de vie du RCSF en minimisant la consommation d'énergie et à assurer une communication en temps réel, nous avons effectué des simulations à l'aide du simulateur réseau NS-3 [1]. Nous avons implémenté notre protocole ERRMS ainsi qu'un autre protocole appelé EDEDA [2] dans

ce simulateur, afin de les comparer. Des expérimentations variées ont été réalisées pour obtenir des courbes et des instantanés représentatifs. Les résultats obtenus ont été extrêmement positifs, démontrant la capacité de notre proposition à atteindre les objectifs énoncés précédemment tout en soulignant la supériorité de ERRMS par rapport à EDEDA.

## **1.5 Structure du rapport**

Afin de fournir un contexte approprié à notre travail, ce mémoire est structuré de manière à présenter les principaux éléments académiques liés à notre recherche ainsi que notre contribution et sa validation. Il est organisé comme suit :

- Le chapitre 1 offre un aperçu général de l'internet des objets et des réseaux de capteurs sans fil, présentant les concepts essentiels nécessaires à une compréhension approfondie de notre travail.
- Le chapitre 2 aborde l'état actuel de la recherche sur le routage en temps réel dans les RCSF, en mettant en lumière les différentes approches, les enjeux et les domaines d'application.
- Le chapitre 3 présente une description détaillée de notre protocole proposée.
- Le chapitre 4 présente la méthodologie de validation utilisée, les résultats obtenus et une discussion sur ces résultats.
- Ce mémoire se termine par une conclusion générale récapitulant notre travail et ses résultats, en mettant en évidence les contributions de notre recherche et les perspectives futures.

# Chapitre 2

## Généralités sur l'internet des objets et les réseaux de capteurs sans fil

### 2.1 Introduction

L'avènement de l'Internet des Objets (IdO) a révolutionné la manière dont les objets interagissent et communiquent entre eux, ouvrant la voie à un monde connecté et intelligent. Ce premier chapitre se plonge dans deux aspects clés de cette révolution technologique : l'Internet des Objets et les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF). Dans la première section, nous explorerons l'essence de l'IdO. Nous débuterons en établissant les fondations conceptuelles en fournissant une définition claire. Ensuite, nous approfondirons notre compréhension en examinant en détail le processus de fonctionnement de l'IdO. La deuxième section se concentrera sur les RCSF. Nous débuterons par la définition claire de leurs contours pour ensuite plonger dans l'architecture de base d'un nœud capteur. Soulignant leur rôle crucial dans l'Internet des Objets, nous explorerons les différents modes de communication (événementiel, périodique et à la demande). Par ailleurs, nous mettrons en lumière les directives et contraintes de conception à prendre en compte, tout en examinant les formes de consommation d'énergie par un nœud capteur. Ensuite, nous aborderons les techniques de conservation énergétique et les stratégies de routage dans les RCSF. Enfin, nous illustrerons ces concepts avec des exemples applicatifs concrets, démontrant ainsi la diversité des applications pratiques dans le domaine.

## **2.2 Internet des objets**

### **2.2.1 Définition**

L'IdO représente un réseau interconnecté d'objets divers, offrant une connectivité omniprésente et instantanée en tout lieu et à tout moment. Le terme "Internet des Objets" a été introduit par Kevin Ashton en 1999, donnant lieu à diverses déclinaisons telles que "Internet des Personnes".

Bien que ces variations puissent être définies individuellement, elles convergent toutes vers l'idée fondamentale de la connectivité universelle, permettant la communication de "n'importe quoi, selon les besoins". L'IdO émerge grâce aux progrès technologiques tels que l'identification par radiofréquence (RFID), les capteurs et les protocoles Internet [3]. Cette approche vise à conférer une intelligence aux objets en encourageant leur interaction mutuelle. Grâce à la généralisation d'Internet et de l'informatique, les dispositifs peuvent échanger des informations et coordonner leurs actions, améliorant ainsi l'efficacité et la fiabilité tout en limitant le besoin d'interventions humaines. Les données du monde réel sont capturées par des dispositifs physiques, partagées entre eux, puis analysées en vue de prendre des décisions. Le concept de l'IdO implique la connexion d'un grand nombre d'appareils en réseau, favorisant une communication sans fil et automatique en tout lieu et à tout moment. Ces avancées ouvrent la voie à une multitude d'applications innovantes, transformant la manière dont les objets interagissent et améliorant notre quotidien.

### **2.2.2 Processus de fonctionnement de l'IdO**

L'IdO est une révolution technologique qui change la manière dont nous interagissons avec notre environnement en intégrant des objets intelligents et connectés dans notre quotidien. Fondamentalement, le fonctionnement de l'IdO repose sur un processus continu, comme illustré dans la figure 2.1, basée sur les informations mentionnées dans [4]. Ce processus comprend les étapes suivantes :

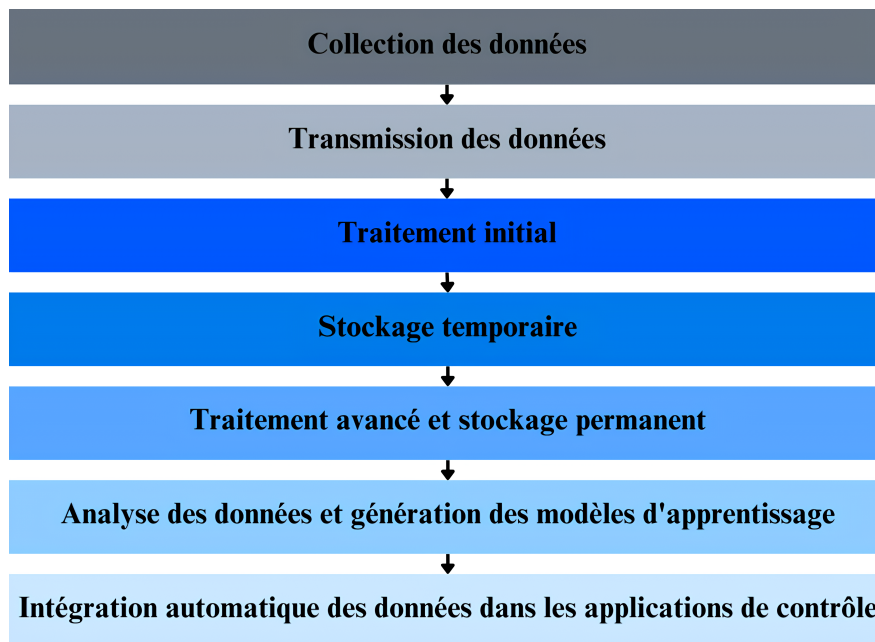


FIGURE 2.1 – Principe de fonctionnement du IdO.

**Collection des données :** les capteurs intégrés aux objets physiques rassemblent des données de leur environnement en fonction de leur fonctionnalité spécifique.

**Transmission des données :** les données collectées sont transmises à une passerelle, qui peut être une unité locale ou directement au cloud, en fonction de la conception du système.

**Traitement initial :** à la passerelle locale, une première phase de traitement peut inclure des opérations de nettoyage des données, de normalisation et de filtrage basique pour garantir la qualité des données transmises au cloud.

**Stockage temporaire :** les données prétraitées peuvent être stockées temporairement localement avant d’être envoyées au cloud. Cela peut être utile en cas de perte temporaire de connexion avec le cloud, assurant une certaine redondance.

**Traitement avancé et stockage permanent :** les données sont ensuite transmises au cloud, où un serveur ou un entrepôt de données les reçoit. Des algorithmes plus avancés sont appliqués pour effectuer des traitements plus approfondies, les résultats sont ensuite stockés de manière permanente dans la base de données du cloud.

**Analyse des données et génération des modèles d’apprentissage :** les données stockées dans le cloud sont soumises à des processus d’analyse de données, tels que le « data mining

» pour extraire des informations plus profondes. Des modèles d'apprentissage automatique peuvent être créés à partir des données pour prédire des tendances futures, détecter des anomalies ou optimiser des processus.

**Intégration automatique des données dans les applications de contrôle :** les résultats de l'analyse, les modèles d'apprentissage ou les informations pertinentes sont intégrés automatiquement dans les applications de contrôle, permettant aux utilisateurs ou aux systèmes de prendre des décisions plus informées.

## 2.3 Réseaux de capteurs sans fil

### 2.3.1 Définition

Un réseau de capteurs sans fil, également connu sous le nom de « Wireless Sensor Network (WSN) », joue un rôle central dans l'IdO, en fournissant une infrastructure robuste pour la collecte et la transmission de données en temps réel. Ces réseaux sont particulièrement adaptés à une variété d'applications, qu'elles soient critiques ou non [5], couvrant divers aspects de la vie quotidienne tels que la surveillance environnementale, la santé, et bien d'autres.

Le cœur du RCSF réside dans le déploiement stratégique de capteurs autonomes, répartis de manière aléatoire ou déterministe dans une zone définie comme la "zone de captage" ou "zone d'intérêt". Ces capteurs, dotés de capacités de mesure spécifiques, établissent un réseau autonome et interconnecté. Les données collectées par ces capteurs sont ensuite généralement acheminées vers un nœud puits, ou une station de base pour les traiter puis transmises ultérieurement par Internet ou par satellite à l'ordinateur central (utilisateur final). Cela permet d'extraire des informations significatives et prendre des décisions éclairées [6]. La figure 2.2 illustre l'architecture d'un RCSF.

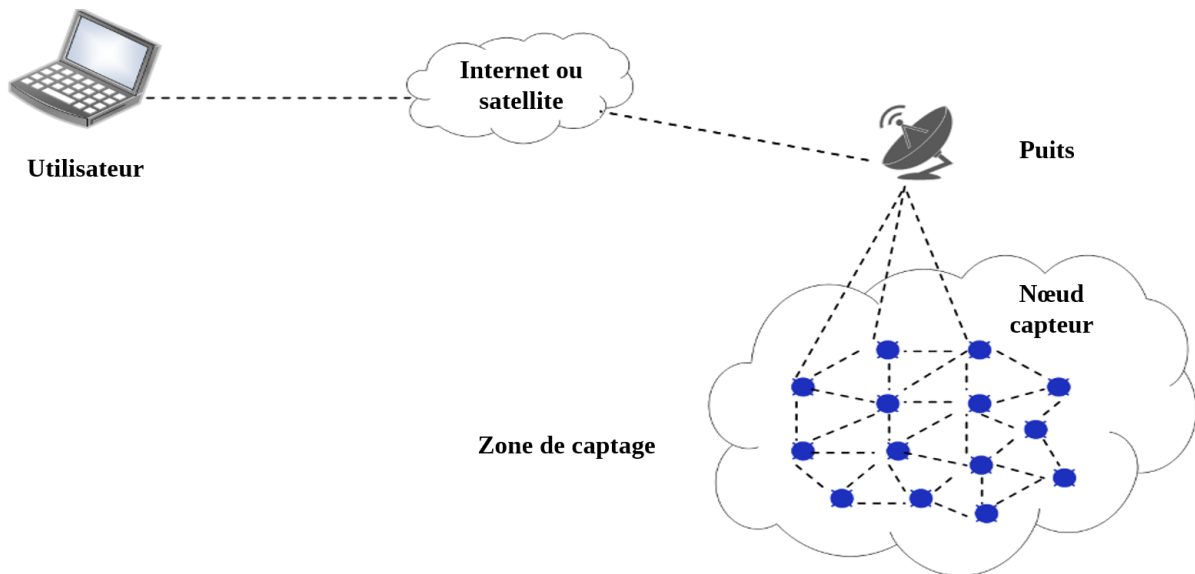


FIGURE 2.2 – Exemple d’un réseau de capteur sans fil.

### 2.3.2 Architecture du nœud capteur

Un nœud capteur est un appareil électronique capable de relever des mesures physiques dans son environnement de déploiement, composé de diverses unités, chacune dédiée à une fonction spécifique : le captage, le traitement ou la communication. Chaque unité accomplit une tâche particulière au sein du nœud capteur, et l’ensemble du dispositif est alimenté par une source d’énergie [7, 8]. Cette structure est illustrée de manière visuelle dans la figure 2.3.

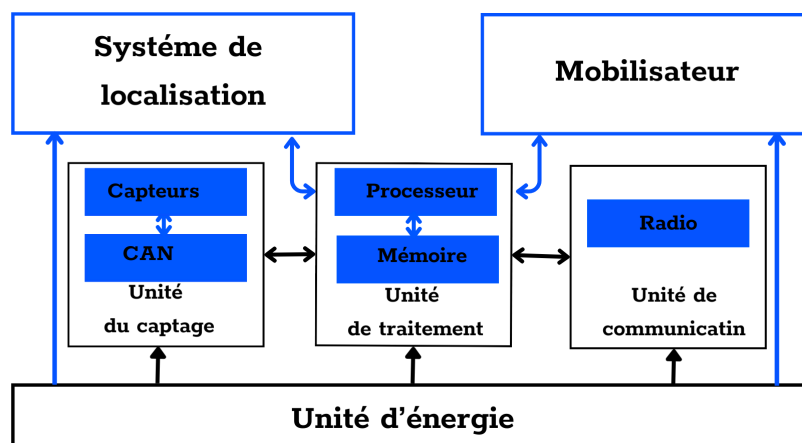


FIGURE 2.3 – Architecture de base d’un nœud capteur.

Les principales unités qui peuvent constituer un nœud capteur sont les suivantes :

**Unité d’énergie :** Cette unité fournit l’énergie nécessaire au fonctionnement de l’ensemble

des composants du nœud capteur. La gestion de la consommation d'énergie représente une considération cruciale pour toutes les applications des RCSF, en raison des contraintes liées aux ressources énergétiques limitées des nœuds.

**Unité de captage :** Cette entité est constituée de deux composants : des capteurs ayant la capacité de mesurer les grandeurs physiques de leur environnement, et des convertisseurs analogique-numérique (CAN ou ADC) chargés de convertir ces mesures en signaux numériques compréhensibles par l'unité de traitement.

**Unité de traitement :** Est constituée d'une mémoire interne et d'un processeur. La mémoire interne est utilisée pour stocker les données collectées ainsi que les programmes de l'application, tandis que le processeur est dédié au traitement des données.

**Unité de communication :** Cette composante est chargée de l'émission et de la réception des données à travers un support de communication radio, facilitant ainsi les échanges entre les capteurs. La radio opère généralement selon quatre modes distincts : transmission, réception, inactif (idle) et veille.

**Système de localisation :** Permettant de déterminer la position physique des capteurs au sein du réseau.

**Mobilisateur :** Ce composant permet la mobilité des capteurs au sein du réseau, ce qui s'avère utile dans diverses applications telles que la surveillance en mouvement, la collecte de données sur des événements mobiles, ou encore la couverture dynamique d'une zone.

## 2.4 Rôle des RCSF dans l'IdO

L'Internet des Objets est une réalité de plus en plus présente, façonnant divers aspects de notre vie quotidienne. Au cœur de cette révolution technologique, les RCSF jouent un rôle crucial en facilitant la connectivité intelligente entre les objets physiques. L'IdO vise à créer un écosystème où les objets peuvent interagir de manière autonome, échangeant des informations pour améliorer notre compréhension de l'environnement et rendre nos activités plus efficaces. Les RCSF, en tant que composant central de l'IdO, permettent aux objets connectés de collecter des données à partir de leur environnement immédiat. Ces réseaux sont équipés de capteurs variés, tels que des capteurs de température, d'humidité, de mouvement, et bien d'autres. Ces

capteurs transforment les informations physiques en signaux électriques, créant ainsi une base de données numérique exploitable. L'élément fondamental d'un RCSF, réside dans sa capacité à effectuer des communications sans fil. Les données collectées par les capteurs sont transmises à travers le réseau, permettant aux objets de partager des informations en temps réel. Cette communication sans fil offre une flexibilité et une accessibilité considérables, créant des opportunités pour des applications innovantes dans des domaines tels que la santé, la domotique, la logistique, et bien d'autres. De manière cruciale, les RCSF, confèrent également un avantage substantiel en termes de mobilité aux objets connectés. La connectivité dynamique et flexible permise par les RCSF, permet aux objets de continuer à interagir et à échanger des données même en mouvement. Cette fonctionnalité revêt une importance particulière pour les applications de l'IdO impliquant des dispositifs mobiles tels que des capteurs portables ou des véhicules connectés.

## 2.5 Modes de communication dans les RCSF

Les réseaux de capteurs proposent trois modes de communication distincts, chacun adapté à des scénarios spécifiques. Ces modes incluent le mode événementiel, le mode périodique et le mode à la demande [9]. Chacun offre des avantages particuliers en fonction des besoins de l'application. Nous explorerons par la figure 2.4 ces différents modes de communication.

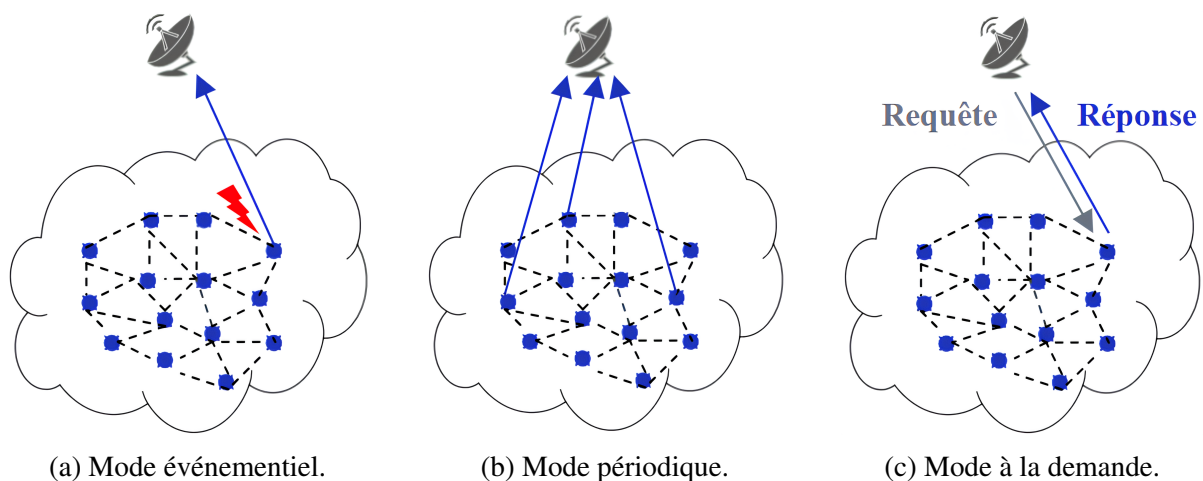


FIGURE 2.4 – Modes de communication dans les RCSF.

### 2.5.1 Communication événementielle

Les capteurs envoient des informations dès qu'un événement particulier se produit, comme illustré par la figure 2.4a. Par exemple, imaginons des capteurs dans un jardin qui envoient une alerte dès qu'ils détectent un manque d'eau dans le sol, signalant ainsi qu'il est temps d'arroser les plantes.

### 2.5.2 Communication périodique

Les capteurs envoient régulièrement des données, même en l'absence d'événements spécifiques, comme illustré par la figure 2.4b. Dans une application météorologique, les capteurs pourraient transmettre des informations sur la température et l'humidité à des intervalles fixes, permettant ainsi de suivre les conditions météorologiques au fil du temps.

### 2.5.3 Communication à la demande

Dans ce mode, le nœud puits émet une requête aux capteurs, demandant spécifiquement l'envoi de données, comme illustré par la figure 2.4c. Prenons l'exemple de la surveillance de l'inventaire dans un entrepôt. Le nœud puits peut demander aux capteurs de transmettre des informations sur les niveaux de stock de certains produits à intervalles spécifiques pour une gestion efficace des stocks.

## 2.6 Contraintes de conception des RCSF

La conception des réseaux de capteurs sans fil pose des défis considérables, notamment en ce qui concerne la gestion de l'énergie limitée des capteurs et les contraintes associées à la communication sans fil. Ces contraintes seront exposées en détail, en se basant sur les informations mentionnées dans les références [7, 6, 10, 11].

**Capacités de traitement et de stockage :** en raison de contraintes financières et de la nécessité de miniaturiser les capteurs, les microcontrôleurs sont souvent privilégiés comme unités de traitement, même s'ils présentent des capacités de stockage et de traitement relativement limitées. Cette situation pose un défi au sein des RCSF, où les nœuds sont régulièrement appelés à accomplir diverses tâches complexes, telles que l'agrégation, la compression et les calculs cryptographiques, notamment dans des contextes liés à la sécurité.

**Une énergie limitée :** les capteurs sans fil, fonctionnant avec des batteries à énergie limitée, sont déployés dans des zones difficiles d'accès, rendant le remplacement des batteries complexe, surtout en cas de nombre élevé de capteurs. Leur durée de vie est ainsi contrainte, d'où l'importance de préserver leur énergie.

**L'équilibrage de charge :** La contrainte d'équilibrage de charge dans les RCSF découle de la nécessité de gérer de manière efficace les ressources énergétiques limitées des capteurs déployés. L'enjeu principal réside dans la prévention de l'épuisement prématuré de l'énergie de certains nœuds (problème de Hot Spot [11]), ce qui pourrait compromettre la durée de vie globale du réseau.

**Taux de communication :** L'augmentation du taux de communication et de partage d'informations engendre une consommation d'énergie insoutenable au sein des RCSF. Les nœuds capteurs doivent préserver leur efficacité opérationnelle sur des périodes prolongées, parfois de plusieurs années [5], afin de répondre à diverses applications. La durabilité de ces applications dépend principalement de la gestion énergétique des nœuds capteurs.

**La zone de couverture :** La zone de couverture d'un nœud capteur dans un RCSF se divise en deux concepts distincts :

- Premièrement, la notion de "zone de captage" : également appelée la couverture des capteurs, se réfère à la capacité d'un capteur à détecter une zone physique spécifique dans son environnement. Cette dernière peut être représentée visuellement par des cercles, bien que cette méthode puisse engendrer des erreurs en raison des différentes caractéristiques de chaque capteur. Une couverture étendue de capteur peut accroître la consommation d'énergie d'un nœud capteur de plusieurs manières. Elle implique souvent la nécessité de transmettre des données sur des distances plus importantes, entraînant une utilisation accrue de la puissance de signal et une consommation d'énergie plus élevée. De plus, une couverture étendue peut demander des transmissions plus fréquentes pour surveiller efficacement une zone plus grande, augmentant ainsi la fréquence d'activité et la consommation d'énergie. Le traitement intensif des données sur une grande zone et la nécessité de maintenir une connectivité sur une portée plus vaste peuvent également contribuer à une augmentation de la consommation d'énergie.
- Deuxièmement, la "portée de transmission" est un aspect lié à la composante radio du

nœud capteur. Elle définit la distance maximale sur laquelle un nœud capteur peut transmettre ses données, dépendant des capacités d'émission de ses antennes et de la puissance du signal émis. Une distance significative entre deux nœuds augmente le risque de perte de données en raison de l'affaiblissement du signal sur de longues distances, entraînant ainsi des coûts énergétiques plus élevés.

**La corrélation :** le déploiement dense de nœuds capteurs dans les zones de captage crée une corrélation des données avec deux aspects distincts : la corrélation spatiale, qui concerne la similarité des données entre des nœuds capteurs proches physiquement, et la corrélation temporelle, qui se réfère à la similitude des données collectées à des moments temporels adjacents. Ces corrélations entraînent une redondance des données, conduisant à un gaspillage d'énergie.

**La taille du capteur :** la contrainte de taille des capteurs repose sur la recherche d'un équilibre entre leur compacité et leurs performances, essentiel pour répondre de manière optimale aux exigences spécifiques de l'application. Cette équation complexe prend en considération divers facteurs tels que la sensibilité du capteur, sa réactivité, sa consommation d'énergie, et d'autres paramètres, garantissant ainsi un fonctionnement optimal du capteur.

**La sécurité :** dans les RCSF la sécurité concerne la protection physique des nœuds capteurs et la sécurité des communications entre eux, garantissant l'intégrité, la confidentialité, et la fiabilité des informations collectées par le réseau

## 2.7 Consommation d'énergie dans les RCSF

Les RCSF jouent un rôle crucial dans la collecte de données pour diverses applications. Cependant, l'efficacité de ces réseaux dépend fortement d'une gestion judicieuse de la consommation d'énergie des nœuds capteurs. Ces nœuds, alimentés par des batteries, doivent optimiser leur consommation d'énergie afin de prolonger à la fois leur durée de vie et celle de l'application à laquelle ils contribuent. Dans la suite de cette discussion, nous examinerons les différentes catégories de consommation d'énergie des nœuds capteurs, en mettant également en lumière d'autres sources de surconsommation d'énergie, puis nous aborderons les techniques visant à conserver l'énergie de manière efficace.

## 2.7.1 Formes de consommation d'énergie par un nœud capteur

Cette section illustre, par la figure 2.5, la consommation d'énergie associée à chaque unité d'un nœud capteur : le captage, le traitement, et la communication, en tenant compte des différents modes de travail de l'unité de communication. Les informations sont basées sur les données fournies dans la référence [12].

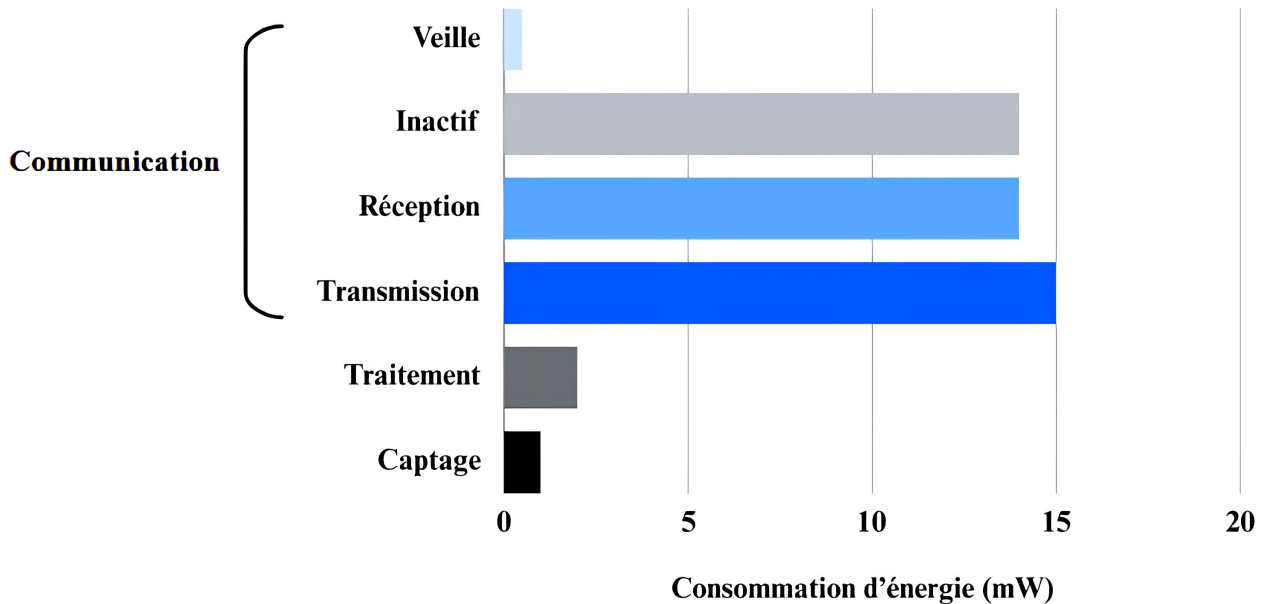


FIGURE 2.5 – Consommation d'énergie par différentes unités d'un nœud capteur.

**Le captage :** Il existe trois types de capteurs pour la détection : passifs omnidirectionnels, passifs directionnels et actifs. Les capteurs passifs enregistrent des données sans altérer l'environnement, ne nécessitant qu'une énergie minimale pour amplifier leur signal. Les capteurs actifs, en revanche, interagissent activement avec l'environnement en émettant des signaux pour obtenir des informations, ce qui nécessite une source d'énergie. En conséquence, les capteurs actifs ont une consommation énergétique plus élevée que les capteurs passifs.

**Le traitement :** Les processeurs sont dotés de divers modes de fonctionnement visant à optimiser la consommation d'énergie. Les principaux modes incluent l'actif, l'inactif et la veille. Chaque mode entraîne une consommation d'énergie spécifique, et même la transition entre les modes consomme de l'énergie.

**La communication :** La composante la plus énergivore d'un nœud capteur est la radio, qui fonctionne à travers quatre modes : transmission, réception, inactif (idle) et veille. Les

modes de transmission et de réception sont les plus énergivores. Notamment, il est essentiel de noter que la consommation d'énergie en mode inactif peut être aussi importante que celle en mode réception. En mode inactif, le nœud reste à l'écoute du canal même sans transmission ou réception, soulignant ainsi l'importance d'éteindre complètement l'émetteur lorsqu'il n'est pas actif. De plus, des quantités substantielles d'énergie sont consommées lors des transitions entre les modes de fonctionnement.

### 2.7.2 Sources de surconsommation d'énergie

Au-delà des formes de consommation d'énergie des nœuds capteurs mentionnées ci-dessus, la consommation inutile d'énergie dans les RCSF émane de diverses autres sources. Nous en mentionnons certaines en nous appuyant sur les informations fournies dans les références [11, 12].

- **Les collisions** : représentent la principale source de surconsommation d'énergie. Elles surviennent lorsque plusieurs paquets sont reçus simultanément par un nœud. Même en cas de collision partielle, tous les paquets impliqués doivent être abandonnés et renvoyés, entraînant ainsi une surconsommation d'énergie due aux retransmissions.
- **L'écoute abusive** : se produit lorsque des nœuds du réseau captent des transmissions qui ne leur sont pas destinées, entraînant ainsi une consommation d'énergie inutile.
- **Les paquets de contrôle** : La réception, la transmission et l'écoute des paquets de contrôle consomment de l'énergie. Bien que ces messages de contrôle soient indispensables, ils ne transportent pas effectivement de données, ce qui provoque une diminution significative du débit utile lorsque leur envoi est fréquent.
- **Problème des Hot Spots** : ce problème dans les RCSF découle du modèle de flux de trafic "many-to-one" et du mode de transmission "multi-hop" des protocoles de routage. Cette configuration crée une distribution inégale de la consommation d'énergie, entraînant un épuisement rapide des nœuds près du point de collecte. Cela provoque une décharge prématurée des nœuds clés, éventuellement conduisant à la partition du réseau et à une réduction anticipée de la durée de vie du réseau.

### 2.7.3 Techniques de conservation d'énergie

En analysant les conclusions tirées de l'étude sur les sources de dissipation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, il est observé que la consommation d'énergie d'un nœud cap-

teur est principalement attribuable aux opérations de détection, de traitement et de communication. Diverses approches sont proposées pour minimiser la consommation d'énergie dans ces réseaux, se décomposant en trois catégories [12, 13] : « Duty-cycling », approches orientées données, et mobilité, comme représenté dans la figure 2.6.

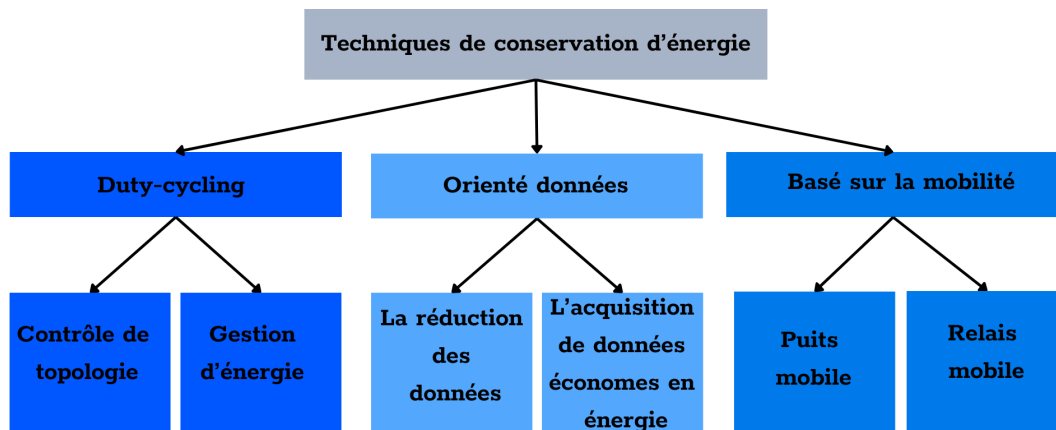


FIGURE 2.6 – Techniques de conservation d'énergie.

### 2.7.3.1 Duty-cycling

Le « Duty-cycling » peut être implémenté de deux manières complémentaires. Tout d'abord, en exploitant la redondance des nœuds dans les réseaux de capteurs, on peut sélectionner de manière adaptative un sous-ensemble minimal de nœuds pour maintenir la connectivité. Les nœuds non essentiels à la connectivité peuvent passer en mode veille afin de conserver de l'énergie. Cette approche, connue sous le nom de "contrôle de la topologie", vise à prolonger la durée de vie du réseau en utilisant la redondance, ce qui augmente généralement cette durée de vie de deux à trois fois par rapport à un réseau où tous les nœuds restent constamment actifs. Deuxièmement, les nœuds actifs, choisis par le protocole de contrôle de la topologie, peuvent éteindre leur radio lorsqu'il n'y a pas d'activité réseau, alternant ainsi entre des périodes de sommeil et de réveil. Ce mode de fonctionnement des nœuds actifs est désigné comme "gestion de l'alimentation". Ainsi, le contrôle de la topologie et la gestion de l'alimentation collaborent pour mettre en œuvre le « Duty-cycling ». Les techniques de gestion de l'alimentation se divisent généralement en deux catégories distinctes : les protocoles de veille/réveil et les protocoles MAC, qui sont détaillés dans la référence [13].

### **2.7.3.2 Orientée données**

Les approches axées sur les données se distinguent des stratégies de « Duty-cycling » en mettant l'accent sur la nature des données dans les réseaux de capteurs, offrant ainsi une efficacité énergétique accrue. Ces approches se divisent en deux catégories principales : la réduction des données et l'acquisition de données économes en énergie. Dans la première catégorie, les techniques de réduction des données comprennent la prédiction et l'agrégation des données. La prédiction implique la création d'un modèle abstrait du phénomène surveillé, permettant d'anticiper les valeurs détectées avec une certaine marge d'erreur. Ces modèles sont présents au niveau du point de collecte et des nœuds capteurs. Lorsque la précision requise est atteinte, les requêtes des utilisateurs peuvent être évaluées au niveau du point de collecte sans nécessiter les données exactes des nœuds capteurs. L'agrégation des données consiste à fusionner les données des nœuds intermédiaires, par exemple en calculant une moyenne des valeurs détectées. La deuxième catégorie de méthodes visant à acquérir des données de manière économe en énergie a pour objectif de réduire la consommation énergétique du module de détection. En réalité, dans certaines applications, le module de détection peut consommer plus d'énergie que la radio ou d'autres composants du nœud capteur. Ces techniques cherchent à diminuer le nombre d'acquisitions, c'est-à-dire les échantillons de données. En réduisant la quantité de données collectées, on diminue le nombre de communications et, par conséquent, on agit sur la consommation du module de détection lui-même, influençant ainsi la consommation totale du réseau. Ces approches sont classifiées en techniques d'échantillonnage adaptatif, qui exploitent la corrélation entre les échantillons mesurés pour réduire la quantité de données à acquérir, en techniques d'échantillonnage hiérarchique, qui supposent l'utilisation de capteurs de types différents et sélectionnent dynamiquement la classe de capteurs à activer pour trouver un compromis entre la précision de la détection et l'économie d'énergie, et en techniques d'échantillonnage actif, qui reposent sur des approches de prédiction de données. [12]

### **2.7.3.3 Basées sur la mobilité**

Comme alternative aux méthodes de « Duty-cycling » et aux approches centrées sur les données, l'intégration de la mobilité des nœuds se profile comme une solution prometteuse pour minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Dans un réseau statique, les paquets suivent des chemins multi-sauts en direction du point de collecte (Puits), influencés par la topologie du réseau et les taux de génération de paquets. Néanmoins, la fixité du puits

peut entraîner une congestion sur certains trajets, provoquant ainsi une décharge rapide des batteries des nœuds situés à proximité du puits, même en ayant recours à des stratégies d'économie d'énergie. Lorsqu'on aborde la mobilité dans les réseaux de capteurs, on distingue deux catégories principales [12] : la mobilité du puits et la mobilité des nœuds relais ou Data Mules.

- La première catégorie, la mobilité du Puits, se réfère au déplacement du point de collecte dans le réseau. Dans cette approche, le puits peut se déplacer vers des emplacements stratégiques pour interagir avec les nœuds capteurs.
- La seconde catégorie, la mobilité des nœuds relais, implique le déplacement de nœuds mobiles spécifiquement conçus pour collecter et transférer des données entre les capteurs et le puits. Ces nœuds mobiles circulent dans la zone de surveillance et établissent des communications avec les capteurs à proximité afin de collecter les données. Ensuite, ils transfèrent ces données vers le puits, contribuant ainsi à économiser l'énergie des capteurs statiques.

## 2.8 Stratégies de routage dans les RCSF

Les protocoles de routage jouent un rôle essentiel au sein des RCSF, visant à optimiser la consommation d'énergie des nœuds capteurs afin de prolonger la durée de vie du réseau. Diverses stratégies ont été élaborées pour minimiser la consommation d'énergie lors du routage et de la transmission des données entre les nœuds capteurs et les stations de base. Ce lien étroit entre le routage et la consommation d'énergie, en particulier au niveau de l'unité de communication, souligne l'importance cruciale des protocoles de routage dans la détermination du chemin optimal pour le transfert des données, avec pour objectif de réduire la consommation d'énergie liée aux transmissions de données au sein des RCSF. Ces recherches continues visent à garantir le fonctionnement optimal des RCSF malgré les défis énergétiques et opérationnels auxquels ils sont confrontés. La Figure 2.7 illustre une classification des divers protocoles de routage centrés sur l'économie d'énergie en basant sur ce qui est mentionné dans la référence [14].

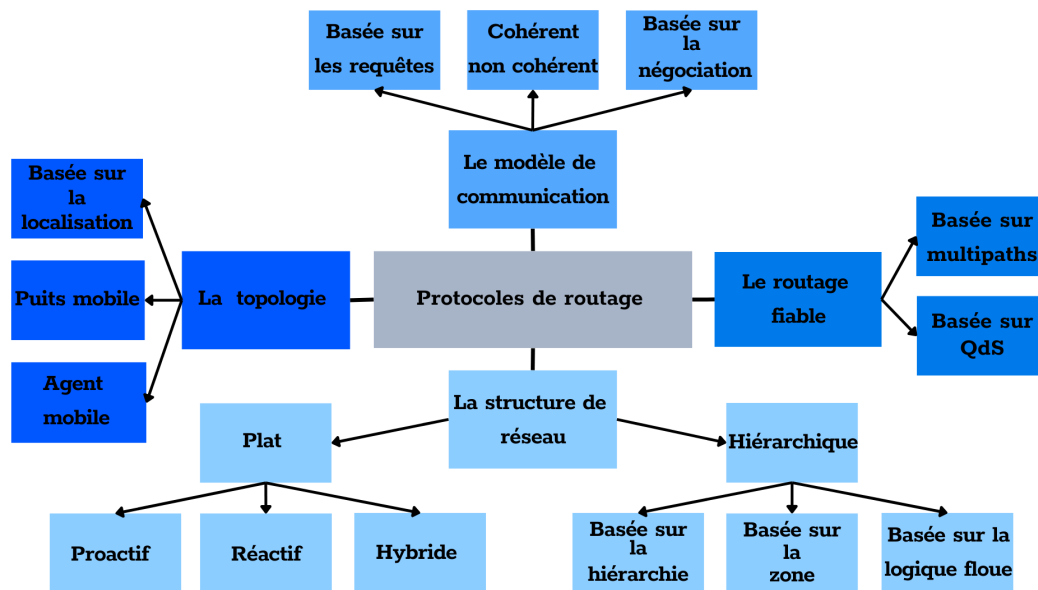


FIGURE 2.7 – Classification des protocoles de routage.

### 2.8.1 Basé sur le modèle de communication

Dans cette catégorie de protocoles, la communication s’effectue de voisin à voisin, généralement via un routage à multi-sauts. Ces protocoles sont classés en trois sous-catégories en fonction de la méthode utilisée pour échanger des données, à savoir : basé sur les requêtes, cohérent/non cohérent, et basé sur la négociation.

- Dans un réseau de capteurs sans fil, le routage basé sur des requêtes implique qu’un nœud émetteur lance une requête pour des données spécifiques. Cette requête se propage à travers le réseau grâce à la collaboration des nœuds voisins, atteignant éventuellement un nœud récepteur qui possède les données demandées. Le nœud récepteur répond ensuite en envoyant les données au nœud émetteur. Ce processus de communication multi-sauts permet de contourner les limites de portée directe et garantit la transmission des données entre des nœuds qui ne sont pas directement connectés, grâce à la coopération des nœuds voisins.
- Dans le contexte Cohérent/Non-cohérent, les nœuds du réseau effectuent des traitements préalables sur les données collectées afin de réduire la taille des données à envoyer. Cependant, la différence réside dans le degré de complexité du traitement. Les protocoles cohérents optent pour des traitements plus légers, tandis que les protocoles non cohérents impliquent des analyses plus approfondies avant de transmettre les données à la

station de base.

- Le principe des protocoles de routage basés sur la négociation implique une pré-négociation entre les nœuds sources et leurs voisins avant l'envoi de données. L'intérêt majeur réside dans l'optimisation de la communication en évitant l'envoi de données redondantes, économisant ainsi l'énergie des nœuds capteurs et assurant une transmission efficace uniquement des données nécessaires à la destination.

## 2.8.2 Basée sur la structure de réseau

Les protocoles de routage liés à la structure du réseau sont classés en deux sous-catégories selon que les nœuds sont considérés comme égaux ou membres d'une hiérarchie. Ces sous-catégories sont les protocoles plats et hiérarchiques.

### Plat

Dans la sous-catégorie "Plat", les nœuds sont considérés comme des entités égales avec des adresses globales uniques. Ces protocoles peuvent être classés en trois catégories opérationnelles différentes : les protocoles proactifs, réactifs et hybrides.

- Les protocoles proactifs maintiennent constamment des informations à jour sur l'ensemble du réseau, même en l'absence d'événements spécifiques. Ils calculent et maintiennent des routes en permanence. Ce qui permet une réponse plus rapide mais entraîne une consommation d'énergie plus importante.
- Les protocoles réactifs, également appelés protocoles à la demande, n'initient le calcul des routes que lorsqu'un nœud souhaite réellement envoyer des données à une destination. Ils ne maintiennent pas d'informations de routage constantes tant qu'il n'y a pas de demande. Ce qui permet une conservation d'énergie mais entraîne une réponse plus lente.
- Les protocoles de routage hybrides fusionnent les caractéristiques des approches proactives et réactives pour optimiser l'efficacité dans les réseaux. Dans un premier temps, ces protocoles pro-activement maintiennent des informations de routage pour les voisins immédiats, réduisant ainsi la surcharge liée à la gestion constante des tables de routage. Lorsque la communication avec des nœuds distants est nécessaire, un mécanisme réactif est activé à la demande pour découvrir une route spécifique. Cette approche permet une économie d'énergie en évitant des mises à jour fréquentes des tables de routage, tout en

garantissant une réponse rapide aux changements du réseau.

## **Hiérarchique**

Dans la sous-catégorie hiérarchique des réseaux de capteurs sans fil, chaque réseau est divisé en clusters, avec un nœud cluster élu spécifique à chaque cluster. Ces nœuds cluster facilitent une communication efficace entre les nœuds du cluster et la station de base, améliorant ainsi la gestion et l'échange de données dans le réseau.

- Les protocoles basés sur la hiérarchie, en établissant des clusters dirigés, demeurent la sous-catégorie prédominante des protocoles de routage économes en énergie, offrant une solution évolutive grâce à une gestion adaptative des clusters basée sur des critères tels que la réserve d'énergie et la proximité des nœuds au nœud cluster.
- La sous-catégorie basée sur la zone subdivise le réseau de capteurs sans fil en zones, fonctionnant soit comme des clusters avec un nœud cluster central, soit comme des zones de communication directe. Chaque zone a un niveau d'énergie spécifique attribué aux capteurs, et des nœuds relais facilitent la transmission des données.
- La sous-catégorie basée sur la Logique Floue [14] repose sur son utilisation pour des opérations critiques, notamment le routage des données, la sélection du nœud cluster, et la gestion globale du réseau, en mettant un accent particulier sur l'optimisation de la consommation d'énergie. En évaluant précisément des paramètres tels que la distance, l'énergie disponible, et la charge du nœud, offrant ainsi une gestion affinée des opérations dans les réseaux de capteurs sans fil et encourageant une utilisation judicieuse des ressources énergétiques.

### **2.8.3 Basée sur la topologie**

La catégorie de protocoles liée à la topologie est subdivisée en trois sous-catégories en fonction de l'utilisation d'informations de localisation, de puits mobiles ou d'agents mobiles pour acheminer les données. Ces sous-catégories sont la localisation, les agents mobiles et les puits mobiles.

- La sous-catégorie "Localisation" des protocoles de réseau de capteurs sans fil utilise des informations de localisation des nœuds pour faciliter un acheminement efficace des données. Ces protocoles sont essentiels car ils permettent de calculer la distance entre

les nœuds et d'estimer la consommation d'énergie. Les informations de localisation sont cruciales pour garantir une communication efficace. Dans cette sous-catégorie, les nœuds sont conscients des positions de leurs voisins ainsi que des sources de messages, qui sont supposées connaître la position de la destination.

- Les protocoles de routage basés sur des puits mobiles impliquent la mobilité d'une station de base dans les réseaux de capteurs sans fil. Contrairement aux réseaux statiques, le puits mobile se déplace de manière aléatoire, contrôlée, ou en suivant des trajets prédéfinis pour collecter des données. Cette approche permet d'optimiser la collecte de données en ciblant des zones spécifiques ou des événements d'intérêt. Pour économiser l'énergie, le déplacement du puits est planifié de manière stratégique, évitant ainsi une collecte de données continue et non nécessaire. La mobilité ciblée réduit les transmissions inutiles, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace des ressources énergétiques du réseau.
- Les agents mobiles, en tant que nœuds autonomes dans les réseaux de capteurs sans fil, jouent un rôle essentiel dans la minimisation de la consommation d'énergie. Leur contribution se manifeste à travers l'optimisation du routage par des algorithmes intelligents, la collecte sélective de données pour réduire les transmissions, et leur capacité à réagir dynamiquement aux changements du réseau. En réalisant des calculs locaux, ils restreignent les transmissions inutiles, prolongeant ainsi la durée de vie des nœuds capteurs et augmentant l'efficacité globale du système.

#### **2.8.4 Basé sur le routage fiable**

Selon le schéma de routage fiable, les protocoles se divisent en deux sous-catégories, en fonction de leur prise en charge de la Qualité de Service (QoS) ou de leur évitement des données redondantes tout en tolérant les défaillances de chemin grâce à l'utilisation de plusieurs trajets. Ces sous-catégories sont basées sur la QoS et basées sur les multipaths.

- Les protocoles QoS cherchent à équilibrer la consommation d'énergie, la qualité des données et le délai de bout en bout en utilisant des métriques telles que le délai, l'énergie et le temps de réponse.
- Les protocoles basés sur les multipaths exploitent divers chemins pour tolérer les défaillances, équilibrer la charge et réduire le délai. Cette approche améliore la fiabilité du

routage et renforce la résilience du réseau, contribuant ainsi à une performance robuste et efficiente.

## **2.9 Domaines d'application de RCSF**

Les réseaux de capteurs sans fil figurent parmi les domaines technologiques connaissant la croissance la plus rapide en raison des nombreux avantages qu'ils offrent. Ainsi, depuis leur avènement initial jusqu'à aujourd'hui, ces réseaux ont connu une évolution constante, trouvant une gamme toujours croissante d'applications. Les domaines d'application principaux sont les suivants :

### **2.9.1 Applications militaires**

Les RCSF jouent un rôle crucial dans le domaine militaire en offrant diverses applications essentielles, telles que la détection d'intrusions, la surveillance de paramètres, la collecte d'informations et le soutien logistique intelligent dans des zones de déploiement inconnues. Ils présentent des avantages significatifs tels que la tolérance aux pannes, la robustesse et un déploiement économique. Dans le cadre de la détection d'intrusions, les RCSF remplacent les mines traditionnelles et permettent de repérer les intrusions de manière sophistiquée et précoce. Pour la surveillance des champs de bataille, ces réseaux sont déployés pour observer minutieusement les zones critiques et les frontières, fournissant des informations en temps réel sur toute activité ennemie, ce qui permet une collecte rapide d'informations et un temps de réponse optimal. Les applications des RCSF ne se limitent pas à la détection d'activités hostiles. Par exemple, l'utilisation de détecteurs acoustiques suspendus sous des aérostats permet de localiser et de suivre des hélicoptères en trois dimensions, offrant ainsi une solution précieuse pour éviter les évasions ennemies. De même, des scanners de chaussures basés sur la quadruple résonance (QR) ont été développés pour distinguer les explosifs rangés dans les chaussures, représentant une avancée significative en matière de sécurité [7].

### **2.9.2 Applications médicales**

Les RCSF jouent un rôle crucial dans le domaine médical, en particulier à travers les Réseaux de Capteurs Corporels Sans Fil (WBAN<sup>1</sup>). Ces derniers se démarquent par leur capacité

---

1. WBAN : Wireless Body Area Networks.

à faciliter les communications lors de procédures médicales, notamment lorsqu'ils sont intégrés au corps humain. Les WBAN se composent de capteurs de petite taille, légers et économiques, pouvant être discrètement positionnés sur le corps, intégrés dans les vêtements (vêtements intelligents), appliqués sous la membrane cutanée, voire implantés profondément dans le tissu corporel. Ces WBAN permettent une surveillance en temps réel de paramètres physiologiques tels que la fréquence cardiaque, la pression artérielle, la température corporelle, voire le taux de glucose sanguin. Ces données sont transmises de manière continue à un centre médical, offrant aux professionnels de la santé un accès immédiat à des informations cruciales pour le suivi des patients souffrant de maladies chroniques, telles que le diabète ou les maladies cardiaques. Ces avancées technologiques révolutionnent la gestion médicale, permettant une approche proactive basée sur des données précises et en temps réel [7].

### **2.9.3 Applications de surveillance**

Les RCSF jouent un rôle crucial dans les systèmes de surveillance en proposant une approche innovante pour la collecte et l'analyse de données. Ces applications exigent le déploiement de capteurs dans des zones généralement inaccessibles aux individus. En cas d'intrusion, ces capteurs déclenchent instantanément des alertes qui sont relayées au centre de contrôle. Outre leur utilité dans les domiciles intelligents, les RCSF sont également largement employés dans des environnements industriels pour la surveillance des paramètres de sécurité et des conditions opérationnelles. Les capteurs stratégiquement positionnés dans les installations industrielles sont capables de détecter des irrégularités telles que des fuites de gaz ou des niveaux de température critiques. Dès qu'une anomalie est détectée, des alertes sont immédiatement transmises aux opérateurs, facilitant ainsi une réaction rapide dans le but de prévenir d'éventuels incidents. Cette utilisation des RCSF dans la surveillance contribue de manière significative à renforcer la sécurité et la réactivité des systèmes.

### **2.9.4 Applications environnementales**

Les RCSF jouent un rôle fondamental dans le domaine de la surveillance environnementale, devenue impérative en raison des changements climatiques et de l'augmentation des catastrophes naturelles. Dans le contexte de la surveillance environnementale, les RCSF sont déployés pour effectuer des mesures périodiques des paramètres météorologiques et hydro-

logiques, souvent dans des environnements hostiles. À titre d'exemple concret, les capteurs peuvent être positionnés dans diverses zones urbaines afin de surveiller en temps réel les niveaux de pollution atmosphérique, y compris les concentrations de particules fines, de dioxyde d'azote, et d'autres polluants. Ces données revêtent une importance cruciale pour évaluer la qualité de l'air, prendre des mesures de protection de la santé publique, et instaurer des politiques visant à réduire la pollution.

### **2.9.5 Applications agricoles**

Dans le cadre de l'agriculture intelligente, l'utilisation des RCSF s'applique aux pratiques agricoles existantes. Un exemple concret de cette application concerne la gestion précise de l'alimentation des cultures. En utilisant des capteurs intelligents pour surveiller en temps réel les niveaux de nutriments du sol, une plateforme centrale analyse ces données afin de déterminer les besoins spécifiques en nutriments du maïs. Des dispositifs automatisés administrent ensuite des quantités précises d'engrais là où nécessaire, évitant ainsi le gaspillage. Cette approche permet de réduire les coûts et l'impact environnemental associés à l'utilisation excessive d'engrais, tout en optimisant les rendements du champ de maïs. Ainsi, cette technologie favorise une agriculture plus efficace, durable et économique.

### **2.9.6 Applications domotiques**

Les RCSF sont largement exploités dans le domaine de la domotique, tirant avantage des avancées technologiques qui ont permis d'intégrer des capteurs dans des équipements couramment utilisés au quotidien à la maison. Par exemple, des capteurs de détection de fuites peuvent être incorporés dans les systèmes de plomberie afin de repérer toute incidence de fuite d'eau. En cas de détection, le système est en mesure de couper automatiquement l'alimentation en eau, prévenant ainsi tout dommage potentiel.

## **2.10 Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons approfondi notre compréhension de l'IdO ainsi que des RCSF. Nous avons clarifié les bases conceptuelles de l'IdO et son fonctionnement, puis nous sommes plongés dans les détails des RCSF, débutant par des concepts de base afin de bien

comprendre les RCSF et leur rôle dans l'IdO. Ensuite, nous avons examiné les différents modes de communication et les défis liés à la conception et à la gestion de l'énergie, nous avons analysé les formes de consommation d'énergie accompagnées des techniques de conservation pour optimiser les performances. Nous avons également abordé les principales stratégies de routage, ainsi que quelques exemples concrets de l'utilisation des réseaux de RCSF. Cette exploration approfondie nous a permis de saisir les enjeux et les défis liés au routage en temps réel dans les réseaux de capteurs sans fil, en alignement avec l'objectif de prolongation de la durée de vie du réseau dans le contexte de l'Internet des Objets. Le prochain chapitre se penchera sur la littérature existante, visant à approfondir notre compréhension du domaine et à identifier les avancées et les lacunes. Cela préparera le terrain pour notre proposition innovante visant à optimiser les réseaux de capteurs sans fil dans le cadre de l'Internet des Objets.

# Chapitre 3

## État de l’art sur le routage en temps réel dans les RCSF

### 3.1 Introduction

Le développement des RCSF a considérablement augmenté les possibilités de communication en temps réel dans l’IdO, contribuant ainsi à une évolution continue et dynamique de la technologie. Ce deuxième chapitre s’attache à explorer en profondeur l’état de l’art du routage en temps réel au sein des RCSF, ainsi que ses implications sur la QdS. Dans cette optique, nous examinerons tout d’abord les fondements de la QdS, en clarifiant sa définition et en identifiant les métriques clés qui la caractérisent. Nous analyserons ensuite les diverses solutions de contrôle de la QdS dans les RCSF, explorant notamment les aspects liés aux protocoles MAC, aux stratégies de routage et au traitement des données. En parallèle, nous plongerons dans l’univers des communications en temps réel au sein des RCSF, en présentant différents modèles de communication et en décomposant les constituants de latence qui les influencent. À travers des exemples concrets de scénarios applicatifs, allant de la surveillance de la santé aux systèmes de contrôle automobile en passant par les villes intelligentes, nous mettrons en lumière l’importance cruciale du routage en temps réel dans la réalisation efficace de ces applications. Enfin, nous aborderons les travaux connexes dans ce domaine, en identifiant les recherches pertinentes et en ouvrant la voie à une discussion approfondie sur les enjeux et les perspectives futures.

## 3.2 Aperçu sur la qualité de service

### 3.2.1 Définition

La Qualité de Service (QoS), également connue sous le nom de Quality of Service (QoS), est un concept officiellement défini par l'UIT comme un ensemble structuré de paramètres et de mécanismes destinés à évaluer, maintenir et améliorer la performance d'un service. Elle joue un rôle déterminant dans le niveau de satisfaction de l'utilisateur. Au sein de réseaux partageant des ressources limitées, tels qu'Internet ou les RCSF, la QoS joue un rôle central en facilitant la différenciation des services. Dans ces environnements où la demande en bande passante et la concurrence pour les ressources sont élevées, la QoS permet d'attribuer des niveaux de priorité aux différents types de trafic. Ainsi, elle garantit une allocation efficace des ressources pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application ou service.

La QoS vise à optimiser la gestion des ressources en prenant en compte deux catégories de facteurs. D'une part, les aspects humains, tels que la stabilité, le délai et la disponibilité, influent directement sur la satisfaction des utilisateurs finaux. D'autre part, les facteurs techniques mesurables, comprenant la fiabilité, la scalabilité et l'efficacité, définissent les critères quantifiables de la qualité de service d'un réseau. La QoS facilite ainsi l'intégration fluide de nouvelles applications dans des réseaux initialement non dimensionnés pour elles, tout en maintenant des niveaux de performance acceptables pour les applications existantes. Elle contribue également à la résolution des défis liés à la congestion du réseau, assurant ainsi une expérience utilisateur optimale même dans des conditions de trafic intense [15].

### 3.2.2 Métriques

L'évaluation de la QoS d'un réseau informatique repose sur la compréhension et l'analyse de diverses métriques, telles que celles mentionnées dans les références [15, 16]. Ces mesures fournissent des indicateurs concrets permettant d'évaluer la performance du réseau, quantifiant de manière précise l'efficacité du réseau dans la satisfaction des besoins des utilisateurs. Cette approche centrée sur les métriques offre une perspective tangible sur la qualité de l'expérience utilisateur, permettant ainsi une évaluation objective de la performance globale du réseau. Parmi ces métriques, on retrouve notamment :

**Débit :** Dans le contexte des réseaux informatiques, correspond à l'utilisation effective de la

bande passante. Cette dernière représente la capacité théorique maximale du réseau, tandis que le débit reflète la quantité réelle de données transmises par unité de temps. Plusieurs facteurs, tels que la congestion, la taille des paquets et d'autres, peuvent influencer le débit d'un réseau. Contrairement à la bande passante, qui est une mesure théorique, le débit offre une perspective concrète sur l'utilisation effective des capacités du réseau.

**Délai :** La mesure des délais au sein d'un réseau informatique est généralement effectuée à travers la latence, qui évalue le laps de temps entre l'envoi et la réception d'un paquet. Cette latence englobe divers retards tels que la propagation du signal, l'attente dans les files d'attente et le traitement du paquet. Une charge élevée peut provoquer une congestion, entraînant une augmentation des délais. Bien que les applications aient des tolérances variables, l'objectif primordial demeure la livraison des données avant qu'elles ne deviennent obsolètes. Les paquets dépassant leur limite peuvent être abandonnés. La gestion efficace des retards est cruciale pour garantir des performances optimales et répondre aux exigences spécifiques de chaque application.

**Gigue :** Dans les réseaux informatiques, il se réfère aux variations de délais entre les paquets d'un flux de données. Elle peut affecter les performances, en particulier dans les applications en temps réel. L'utilisation de tampons peut atténuer la gigue en lissant les variations de délais, mais cela introduit un délai supplémentaire. Gérer la gigue est crucial pour assurer des communications fluides, surtout là où la synchronisation temporelle est essentielle.

**Taux de perte de paquets :** Ce taux mesure la proportion de paquets perdus lors de la transmission. La perte de paquets survient lorsque des données ne parviennent pas à leur destination dans un réseau, et cela peut être causé par des facteurs tels que la congestion, des erreurs de transmission, ou des problèmes de connexion. Cette perte potentielle peut impacter la qualité des applications. Cependant, dans des contextes tels que le streaming multimédia, des pertes mineures sont souvent tolérées sans affecter de manière significative l'expérience utilisateur. En revanche, pour des applications cruciales comme les e-mails, des mécanismes sont indispensables pour garantir une livraison fiable, incluant des retransmissions ou l'utilisation de protocoles fiables.

### **3.2.3 Solutions de contrôle de la QoS dans les RCSF**

L'amélioration de la QoS dans les RCSF requiert des solutions de contrôle spécifiques pour surmonter les défis liés à la variabilité environnementale, aux ressources limitées et aux contraintes énergétiques. Plusieurs approches, telles qu'abordées dans la référence [15], ont été développées pour optimiser les performances des RCSF en garantissant une transmission de données fiable et efficace, tout en prenant en compte leurs particularités telles que la gestion de l'énergie et la communication limitée entre les nœuds. Nous explorerons maintenant ces solutions de contrôle de la QoS.

#### **3.2.3.1 Solutions MAC**

Les protocoles MAC, qui signifient "Medium Access Control" (contrôle d'accès au support), occupent une position cruciale dans la gestion de l'accès aux canaux sans fil partagés. Leur fonction consiste à réguler l'utilisation du canal par divers dispositifs sans fil afin d'éviter des conflits et d'optimiser l'efficacité de la transmission des données. Trois approches principales sont adoptées par ces protocoles en fonction des besoins des applications : les méthodes avec contention, où les dispositifs se disputent l'accès au canal par des mécanismes de détection de porteuse ou de détection de collision, les méthodes sans contention, qui attribuent des plages de temps spécifiques à chaque dispositif pour transmettre ses données, et les méthodes d'accès hybrides, qui combinent des éléments des deux précédentes pour une optimisation accrue.

#### **3.2.3.2 Routage**

Les protocoles de routage jouent un rôle crucial dans la garantie de la QoS de bout en bout dans un environnement multi-sauts, au niveau de la couche réseau. Leur responsabilité principale est de choisir le chemin optimal pour la transmission des paquets, tout en respectant les exigences spécifiques de l'application, favorisant ainsi une latence minimale ou une fiabilité accrue. Cette capacité à optimiser le cheminement des paquets contribue également à une gestion judicieuse de la bande passante, évitant ainsi la congestion du réseau. De plus, le routage peut permettre la priorisation du trafic, accordant des niveaux de priorité aux données critiques en temps réel. L'optimisation énergétique est également un aspect essentiel, où les protocoles de routage peuvent être conçus pour minimiser la consommation d'énergie des capteurs, prolongeant ainsi leur durée de vie opérationnelle tout en maintenant une QoS acceptable. L'adaptabilité dynamique à des changements tels que la mobilité des capteurs ou les

fluctuations environnementales est intégrée, tout comme la gestion des erreurs pour assurer une transmission fiable des données. En combinant ces caractéristiques, les protocoles de routage spécifiques aux RCSF créent un environnement où la QoS est soigneusement contrôlée, garantissant des performances fiables et adaptatives pour les applications déployées dans ces réseaux de capteurs sans fil.

### **3.2.3.3 Traitement des données**

L'amélioration du traitement des données dans les réseaux, essentiellement pour économiser de l'énergie et réduire la charge du réseau, repose sur l'agrégation des données. Cette technique regroupe des données similaires pour réduire la quantité d'informations transmises, améliorant ainsi l'efficacité énergétique, en particulier dans le "Backbone" du réseau. Diverses méthodes, telles que l'agrégation basée sur les clusters, sur l'arbre d'agrégation, sur le traitement distribué "In-Network" et centralisée "out-of-network", sont utilisées pour atteindre ces objectifs, contribuant à une meilleure QoS dans les réseaux de communication.

### **3.2.3.4 Cross-layer**

Le concept de Cross-layer, ou interconnexion de couches, remet en question le modèle traditionnel de communication en couches, tel que défini par les modèles OSI et TCP/IP. Dans ces modèles, chaque couche a pour rôle d'offrir des services à la couche supérieure adjacente, assurant une certaine transparence pour éviter que les couches supérieures aient connaissance des détails des couches inférieures. Cette approche standardisée facilite la création et l'interopérabilité des protocoles de communication à travers des interfaces prédéfinies. Cependant, cette rigidité peut entraîner une utilisation moins efficace des ressources du réseau, notamment dans des environnements dynamiques, compromettant ainsi la qualité de service. Le concept de Cross-layer repose sur l'idée d'optimiser le contrôle et l'échange d'informations entre deux ou plusieurs couches de la pile protocolaire en utilisant un agent ou un plan de gestion partagé. L'objectif principal est d'améliorer les performances en exploitant l'interaction entre les protocoles des différents niveaux du modèle OSI. Contrairement à l'approche stricte et prédéfinie des communications en couches, le Cross-layer permet une adaptation plus souple aux changements dynamiques du réseau, offrant ainsi la possibilité d'optimiser les ressources et d'améliorer la qualité de service.

## **3.3 Communication en temps réel dans les RCSF**

### **3.3.1 Présentation**

La communication en temps réel au sein des RCSF revêt une importance cruciale dans le contexte actuel. Elle permet une transmission instantanée et synchronisée d'informations entre les capteurs au sein d'un réseau, favorisant ainsi une réactivité accrue et une gestion efficace des données. Cette capacité à établir des échanges en temps réel facilite la coordination des actions au sein du système, améliorant ainsi la prise de décision et la résolution des problèmes de manière prompte. Dans un monde où la rapidité et la précision sont des éléments clés, la communication en temps réel dans les RCSF joue un rôle essentiel en répondant aux exigences croissantes des applications qui dépendent de plus en plus de cette caractéristique. En effet, L'évolution constante des technologies et les besoins croissants des utilisateurs génèrent une demande de plus en plus forte en matière de temps réel, permettant aux applications de fonctionner de manière synchronisée et instantanée afin de relever les défis contemporains. Par conséquent, la communication en temps réel au sein des RCSF demeure un pilier central, offrant des opportunités significatives pour améliorer l'efficacité et la réactivité des systèmes complexes et interconnectés.

### **3.3.2 Modèles de communication**

Les modèles de communication en temps réel au sein des RCSF, comme détaillés dans la référence [17], jouent un rôle crucial dans la conception de systèmes adaptés à différentes contraintes temporelles. Classifiés en catégories "hard", "soft" et "firm" avec des approches spécifiques pour la gestion des délais, comme illustré dans la figure 3.1, ces modèles ouvrent la voie à deux principales catégories de solutions [17]. D'une part, il y a des approches liées au contrôle d'accès au support (MAC) et à l'ordonnancement TDMA, et d'autre part, des stratégies axées sur les protocoles de routage. Chaque modèle offre une perspective unique sur la manière dont les systèmes peuvent répondre aux exigences temporelles, offrant ainsi une diversité d'approches pour la conception de systèmes réactifs et efficaces.

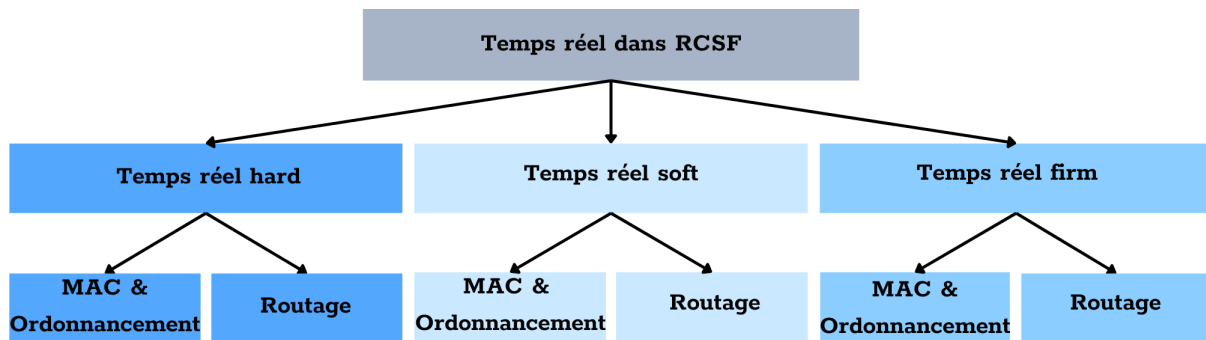


FIGURE 3.1 – Modèles de communication en temps réel .

### 3.3.2.1 Temps réel hard

Dans les systèmes de communication en temps réel hard, l'accent est mis sur la transmission d'informations avec des contraintes temporelles très strictes. tout retard ou dépassement des délais spécifiés est considéré comme inacceptable. Cela peut entraîner des dysfonctionnements graves du système.

La mise en place de communications temps réel hard dans les RCSF présente des défis en raison de contraintes diverses, notamment des variations imprévisibles dans le délai de bout en bout des communications multihop. Pour pallier cela, une approche courante consiste à adopter une topologie en étoile avec une seule étape, simplifiant la gestion du temps, mais présentant des limitations en termes de couverture et de robustesse du réseau.

Dans le domaine des communications temps réel hard dans les RCSF, divers schémas ont été développés. Ces schémas visent à optimiser la gestion du temps, l'ordonnancement des transmissions et le routage des données pour répondre aux exigences strictes de temporisation imposées par des applications critiques telles que l'automobile ou l'industrie. Ces schémas comprennent les protocoles MAC, l'ordonnancement TDMA et les protocoles de routage.

- **MAC et ordonnancement TDMA :** Des algorithmes tels que Implicit Earliest Deadline First (I-EDF) [18] et Source Aware Scheduling (SAS-TDMA) [19] optimisent l'ordonnancement pour éviter les collisions et réduire les surcharges. D'autres protocoles comme Dual-MAC [20] et WAHREN [21] explorent différentes approches pour garantir des temps d'exécution stricts. Des extensions comme DSME [22] et LLDN [22], ainsi que Wireless HART [23], utilisent des solutions variées pour améliorer la fiabilité et

les performances dans des applications allant des réseaux industriels aux systèmes de contrôle sans fil.

- **ROUTAGE :** Parmi les protocoles de routage en temps réel hard proposés pour les RCSF, TTEthernet [24] se distingue par sa conception spécifique répondant aux exigences strictes du temps réel. Fondé sur une approche time-triggered, ce protocole planifie les communications à l'avance, assurant des délais déterministes grâce à l'utilisation d'un horaire préétabli. Du point de vue du routage, il adopte un algorithme déterministe, minimisant les variations de latence et garantissant une transmission fiable des données. TTEthernet constitue une solution idéale pour les besoins du temps réel dans des environnements critiques soumis à des contraintes temporelles strictes.

### 3.3.2.2 Temps réel soft

Les communications en temps réel soft dans les RCSF se distinguent par leur flexibilité, autorisant une adaptation aux variations temporelles sans imposer de contraintes strictes, contrairement aux systèmes hard où la rigidité des délais est impérative.

Ces communications englobent des protocoles MAC, d'ordonnement TDMA et de routage adaptés à des applications nécessitant une réponse rapide, sans nécessairement imposer de délais stricts. Ces protocoles offrent ainsi une gestion souple des délais, permettant une adaptation aux variations temporelles tout en assurant une réactivité adéquate aux exigences de certaines applications.

- **MAC et ordonnancement TDMA :** divers protocoles MAC et d'ordonnement ont été développés, tels que le Real-Time Hybrid MAC (RTH-MAC) [25] combinant TDMA et FDMA, le Soft Real-Time Shared Time slot (SRTST) [26] pour les applications automobiles, et le GinLITE [27] assurant la fiabilité avec un calendrier TDMA statique. Ces protocoles, variés dans leurs approches, sont conçus pour répondre aux besoins spécifiques des communications souples en temps réel dans des contextes de topologies dynamiques.
- **ROUTAGE :** Divers protocoles de routage en temps réel soft ont été proposés pour les RCSF. Le protocole SPEED [28], avec ses variantes comme MMSPEED et FT-SPEED, est bien connu pour ses performances en communication en temps réel. SPEED utilise la géographie non déterministe et le contrôle de congestion pour garantir la vitesse de livraison souhaitée. MMSPEED [29] crée des couches de vitesse virtuelles pour classer

les paquets en fonction de la priorité, tandis que FT-SPEED [30] se concentre sur la tolérance aux pannes avec des schémas tels que Void Announce et Void Bypass. D'autres protocoles de routage soft incluent ERTLD [31], qui sélectionne le nœud de transfert optimal en fonction du RSSI, de la batterie restante et du retard du paquet. PRTR [32] divise les paquets en temps réel et non en temps réel pour éviter la congestion. EE-ARP [33] combine l'adaptation de la puissance de transmission avec le routage géographique pour améliorer l'efficacité énergétique. Ces protocoles visent à garantir la communication en temps réel, à minimiser la congestion et à optimiser l'utilisation de l'énergie dans les RCSF.

### 3.3.2.3 Temps réel firm

Le modèle  $(m, k)$ -firm [34] spécifie la répartition des pertes dans un système de communication, notamment pour la transmission de paquets. Il garantit un niveau de fiabilité en exigeant que, dans un intervalle de temps donné, au moins  $m$  paquets parmi  $k$  paquets consécutifs soient transmis avec succès. Lorsque  $m = k$ , cela correspond à ce que l'on appelle le temps réel dur, également noté  $(k, k)$ -firm. Cela signifie que tous les  $k$  paquets consécutifs doivent être transmis avec succès dans le délai imparti, assurant ainsi une fiabilité maximale pour chaque intervalle de temps. Un nombre de paquets transmis avec succès inférieur à la valeur spécifiée de  $m$  dans le modèle  $(m, k)$ -firm peut entraîner des dysfonctionnements du système.

Cette approche vise à établir un équilibre entre la tolérance aux pertes et la qualité de service dans les systèmes de communication. Les protocoles mis en place doivent efficacement gérer la transmission d'informations en temps réel, tout en respectant des contraintes spécifiques liées à la fermeté des délais, garantissant ainsi une réponse dans des délais stricts et déterministes.

Des approches ont été développées pour répondre aux flux  $(m, k)$ -firm dans des protocoles MAC, d'ordonnancement TDMA et de routage.

- **MAC et ordonnancement TDMA** Ces protocoles attribuent dynamiquement des priorités en fonction de la distance, du temps, et de la stabilité du lien, tout en prenant en compte la congestion. Certains visent à minimiser les paquets sur des canaux de mauvaise qualité, tandis que d'autres assurent un ordonnancement dynamique de créneaux temporels pour éviter les problèmes de famine. Un schéma de priorités décentralisées est également utilisé pour réduire les défaillances dynamiques dans un protocole MAC

amélioré.

- **Routage** : En ce qui concerne le routage, différentes stratégies sont envisagées, allant de l'extension de protocoles existants comme SPEED à l'ajustement de protocoles tels que PSFQ [35]. De plus, des mécanismes de récupération basés sur des critères tels que la vitesse, la distance et le temps restant sont introduits. Certains protocoles, comme LQER [36], se concentrent spécifiquement sur l'estimation précise de la qualité des liens. L'utilisation d'architectures à couches croisées permet de régler la portée, la priorité des paquets et d'établir des itinéraires multiples. Simultanément, certaines approches intègrent divers critères pour améliorer l'efficacité énergétique et prolonger la durée de vie du réseau.

### 3.3.3 Constituants de latence de communication

La latence de communication joue un rôle essentiel dans le domaine des réseaux et des systèmes informatiques, constituant une mesure clé pour évaluer le temps nécessaire à la transmission d'informations d'un point à un autre. Dans le domaine des réseaux, une latence minimale est souvent cruciale pour garantir des expériences utilisateur fluides, en particulier dans des applications telles que la visioconférence, les jeux en ligne, ou d'autres services en temps réel. Dans le cadre des systèmes informatiques, une faible latence peut améliorer les performances globales des applications, réduire les temps de réponse et optimiser l'efficacité opérationnelle. La latence de communication est le résultat de divers délais, et chaque composant de ces délais joue un rôle significatif dans le temps total nécessaire à la transmission des données. Cela inclut le temps de traitement, d'attente, de transmission et de propagation. Afin d'approfondir notre compréhension de cette mesure, nous examinerons les différents délais contribuant à la latence de communication, en nous appuyant sur les informations référencées dans [37, 38].

#### 3.3.3.1 Délai de traitement

Il se réfère à la durée totale nécessaire pour qu'un paquet de données, depuis son arrivée à l'entrée d'un nœud du réseau, traverse le processus de traitement, englobant diverses étapes :

- **Traitement à l'arrivée du paquet** : Cette phase peut impliquer des opérations spécifiques à la transmission, telles que la vérification de l'en-tête et la prise de décisions de routage. Elle peut également englober des opérations spécifiques à la réception, comme la vérification de l'en-tête et la décision de remettre le paquet à la couche application

ou de le transmettre à un autre nœud.

- **Traitement après l'entrée dans la file d'attente :** Une fois que le paquet a été examiné et que des décisions initiales ont été prises, il peut être placé dans une file d'attente en attendant son tour pour être traité par le CPU. Ce traitement peut englober des opérations spécifiques à la transmission du paquet, telles que l'exécution du code de routage, la mise à jour des tables de routage pour garantir des décisions de routage efficaces et actuelles, ainsi que d'autres opérations. Il peut également inclure des opérations spécifiques à la réception, telles que la vérification de l'intégrité des données et la détermination de la destination finale du paquet au sein du nœud.

### 3.3.3.2 Délai d'attente

Il se rapporte à la durée écoulée entre le moment où un paquet de données entre dans une file d'attente, que ce soit à la sortie d'un nœud (paquet en attente de transmission) ou à l'entrée d'un nœud (paquet en attente de réception), et le moment où le paquet commence effectivement à être traité ou transmis. Une file d'attente peut se former en raison de la congestion du réseau, lorsque la capacité du nœud est dépassée, entraînant un retard supplémentaire pour les paquets en attente. Ce délai d'attente peut influencer négativement la performance du réseau en introduisant des retards imprévus, augmentant ainsi la latence totale.

### 3.3.3.3 Délai de transmission

Le délai de transmission se réfère au temps nécessaire pour qu'un émetteur transmette l'intégralité d'un message, depuis l'envoi du premier bit jusqu'à la transmission du dernier bit. Ce délai est essentiellement défini par la taille du message à transmettre et la capacité de transmission du canal. Il est influencé par des facteurs tels que la bande passante disponible, la technologie de transmission utilisée, ainsi que la charge du réseau. Une transmission lente peut entraîner des retards dans la livraison des informations, impactant la réactivité globale du réseau. Par conséquent, la minimisation du délai de transmission est cruciale pour optimiser la latence et améliorer la performance des communications dans les réseaux.

### 3.3.3.4 Délai de propagation

Le délai de propagation se définit comme le temps nécessaire pour qu'un bit se propage du point d'émission (émetteur) au point de réception (récepteur) à travers le support de trans-

mission, tel qu'un câble ou un espace libre (l'air, par exemple). Ce délai est principalement influencé par la distance physique entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que par la vitesse de propagation du signal dans le support de transmission. Des facteurs tels que la nature du câble ou du support utilisé peuvent également exercer une influence sur le délai de propagation. Une distance physique plus grande ou une vitesse de propagation plus lente peuvent entraîner des délais significatifs dans la transmission de l'information. Bien que certaines technologies permettent de minimiser ce délai, il reste un facteur important à prendre en compte, en particulier dans les réseaux à grande échelle ou les communications sur de longues distances.

### **3.3.4 Exemples de scénarios applicatifs**

Les communications en temps réel au sein des RCSF occupent une place prépondérante dans diverses applications contemporaines. L'évolution rapide des technologies a accentué la nécessité de transmettre des données en temps réel pour répondre aux exigences croissantes de nombreux domaines. Que ce soit dans le domaine de la santé, de la surveillance environnementale, de l'industrie, ou des villes intelligentes, les communications en temps réel au sein des RCSF offrent des solutions efficaces. Ces réseaux permettent une collecte et une transmission instantanée de données, facilitant ainsi la prise de décision en temps réel et améliorant la réactivité des systèmes. Mettons maintenant en évidence quelques scénarios d'application courants.

#### **3.3.4.1 La surveillance de la santé**

L'application de surveillance de la santé basée sur les RCSF permet une gestion proactive des patients dans les hôpitaux modernes. Chaque patient est équipé de capteurs médicaux connectés à un réseau sans fil dédié, assurant une surveillance en temps réel de paramètres vitaux tels que la fréquence cardiaque, la pression artérielle et la saturation en oxygène. Les données sont transmises instantanément au centre médical via le RCSF, permettant aux médecins et professionnels de la santé un suivi en temps réel, même à distance. En cas de valeurs anormales ou de situations médicales critiques, le système génère automatiquement des alertes dirigées vers le médecin en charge, favorisant une intervention rapide. Cette approche proactive améliore significativement la réactivité des soins médicaux, réduit les risques potentiels et contribue à une meilleure qualité de vie pour les patients.

#### **3.3.4.2 Les systèmes de contrôle automobile**

Dans un système de contrôle embarqué, des capteurs sans fil sont intégrés dans les composants critiques du véhicule, surveillant en temps réel des paramètres tels que la pression des pneus, la température du moteur et le système de freinage. Lorsqu'une déviation significative est détectée dans l'un de ces paramètres, le système réagit instantanément en ajustant les performances du véhicule, en activant des avertissements sonores ou visuels, voire en prenant des mesures correctives automatiques. Par exemple, en cas de diminution soudaine de la pression des pneus, le système réagirait en temps réel en alertant le conducteur et, si nécessaire, en ajustant la pression des pneus de manière automatisée pour maintenir la sécurité. Ainsi, l'application du temps réel dans les RCSF pour l'automobile offre un niveau de sécurité et de réactivité essentiel pour des performances optimales sur la route.

#### **3.3.4.3 La surveillance environnementale**

Dans le cadre de la surveillance environnementale, des capteurs sans fil sont disséminés dans une zone naturelle sensible. Ces capteurs mesurent en temps réel des paramètres tels que la qualité de l'air, la température, l'humidité et les niveaux de pollution. En cas de détection d'une augmentation soudaine de la pollution ou d'une variation significative de la qualité de l'air, les capteurs transmettent instantanément ces informations au centre de contrôle via les RCSF. Les autorités environnementales peuvent alors réagir rapidement en déployant des mesures d'atténuation, en alertant la population locale, ou en prenant d'autres actions nécessaires pour préserver l'écosystème. Ainsi, l'application du temps réel dans les RCSF pour la surveillance environnementale offre un outil précieux pour une gestion proactive et efficace des ressources naturelles.

#### **3.3.4.4 Les villes intelligentes**

Dans une ville intelligente, des capteurs sans fil sont intégrés dans le système de gestion du trafic urbain. Ces capteurs surveillent en temps réel le flux de véhicules, les niveaux de congestion, et les conditions météorologiques. Les données collectées sont transmises instantanément aux centres de contrôle. En cas de congestion soudaine due à des conditions météorologiques adverses, les feux de circulation peuvent être ajustés en temps réel pour favoriser des itinéraires alternatifs et minimiser les retards. Les informations sont également relayées aux applications mobiles des citoyens pour les informer des itinéraires les plus rapides. Cette utilisation du

temps réel dans les RCSF permet une gestion proactive du trafic, améliorant ainsi la fluidité de la circulation, réduisant les temps de trajet et contribuant à une expérience de déplacement plus efficace et agréable pour les résidents de la ville intelligente.

## 3.4 Travaux connexes au routage en temps réel dans les RCSF

Dans cette section, nous présenterons brièvement certaines contributions notables se concentrant sur deux aspects essentiels des RCSF : le routage en temps réel et l'optimisation de la consommation d'énergie pour prolonger la durée de vie des RCSF, mettant en évidence les récentes avancées. Ensuite, dans la section discussion, nous analyserons et effectuerons une comparaison entre ces travaux, cherchant à identifier les tendances émergentes ainsi que les lacunes susceptibles de guider notre propre contribution. Ainsi, tout en examinant quelques travaux précurseurs, nous nous pencherons également sur les opportunités envisageables pour de futures avancées dans le domaine des RCSF.

### 3.4.1 Travaux considérés

#### Le protocole DEDA

L'article [37] présente le protocole DEDA<sup>1</sup> comme une solution pour résoudre le défi de l'agrégation de données dans les RCSF à contraintes de temps. L'accent est mis sur l'optimisation de la consommation d'énergie tout en respectant une contrainte de délai spécifique. DEDA utilise un modèle de délai en deux étapes, distinguant les scénarios de faible et fort trafic. Le délai de bout en bout est représenté par le nombre de sauts dans le premier cas, et par la somme des degrés des nœuds le long d'un chemin de routage dans le second cas. Le réseau est modélisé comme un graphe de disque unitaire (UDG<sup>2</sup>), et un sous-graphe d'arbre couvrant minimal localisé (LMST<sup>3</sup>) est construit. En utilisant exclusivement les arêtes de LMST, un arbre de plus court chemin (économique en énergie) est créé, enraciné à l'acteur pour l'agrégation de données. Les auteurs suggèrent également d'intégrer DEDA avec un algorithme localisé d'ordonnancement d'activité des capteurs (A-DEDA) et un algorithme de construction d'un ensemble dominant connecté de nœuds (AC-DEDA) pour améliorer l'efficacité énergétique et

---

1. DEDA : localized Delay-bounded and Energy-efficient Data Aggregation  
2. UDG : Unit Disk Graph  
3. LMST : Local Minimum Spanning Tree

la fiabilité en termes de délai.

## **Le protocole SPEED**

Le protocole SPEED, présenté dans l'article [39], a été spécifiquement conçu pour répondre de manière efficace aux exigences de communication en temps réel au sein des RCSF à contraintes de temps. En combinant un contrôle de rétroaction et un acheminement géographique non déterministe, SPEED vise à maintenir une vitesse de livraison optimale à travers le réseau. Son objectif est de minimiser les délais bout en bout tout en offrant une réponse robuste aux congestions et aux zones vides. Pour ce faire, le protocole s'appuie sur divers composants, dont une API, un échange de beacons entre voisins, une estimation des délais, l'algorithme SNGF<sup>4</sup>, ainsi que des mécanismes tels que la rétroaction de voisinage et le réacheminement sous pression. En optimisant la vitesse de transmission tout en adaptant dynamiquement le réseau aux conditions changeantes, SPEED se positionne comme une solution efficace pour les applications en temps réel dans les RCSF.

Différentes améliorations ont été apportées au protocole SPEED. Parmi ces extensions, on trouve : MMSPEED, POWER-SPEED et EA-SPEED.

Le protocole MMSPEED (Multipath Multi-SPEED) [29] introduit des modifications significatives par rapport à SPEED pour améliorer la QoS dans les RCSF. Les principales modifications incluent l'ajout de plusieurs niveaux de vitesse, l'utilisation de la multiplicité des chemins et des vitesses pour des garanties probabilistes de QoS, et l'intégration d'un mécanisme de compensation dynamique. Ces ajustements visent à répondre de manière plus efficace aux exigences de délai, de fiabilité et de ponctualité des paquets, tout en offrant une gestion adaptative des décisions locales pour une fourniture globale optimale de la QoS.

La modification apportée par le protocole POWER-SPEED (A Power-Controlled Real-Time Data Transport Protocol for Wireless Sensor-Actuator Networks) [40] au protocole SPEED réside dans l'ajout de la sélection des niveaux de transmission en fonction du temps restant avant l'expiration du paquet. Cette fonctionnalité permet à POWER-SPEED d'ajuster dynamiquement la puissance de transmission pour optimiser l'efficacité énergétique tout en respectant les contraintes de latence des paquets, ce qui le rend plus efficace pour le transport de données en temps réel dans les RCSF.

---

4. SNGF : Stateless Non-deterministic Geographic Forwarding algorithm

EA-SPEED (energy-aware real-time routing protocol for wireless sensor networks) [41] améliore le protocole SPEED en intégrant deux modifications clés. Tout d'abord, avec le mécanisme DPD<sup>5</sup>, il détecte et élimine rapidement les paquets retardés, économisant ainsi l'énergie en évitant le traitement de données inutilement retardées. Deuxièmement, grâce au mécanisme NEB<sup>6</sup>, il équilibre la consommation d'énergie des nœuds voisins en prenant des décisions de routage basées sur l'énergie résiduelle des prochains sauts candidat et la vitesse de relais vers ces derniers nœuds. Ces ajustements visent à prolonger la durée de vie du réseau tout en maintenant des performances optimales pour le routage en temps réel.

### **L'algorithme FCR**

L'article [42] se concentre sur la problématique de la sélection du cluster head dans les RCSF afin d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les délais dans le routage des données. Pour résoudre ce problème, l'article propose l'utilisation de l'algorithme FCR (Firefly with Cyclic Randomization), une extension novatrice de l'algorithme Firefly spécialement conçue pour aborder ces défis complexes. Dans le contexte de la communication en clusters, les nœuds du réseau sont regroupés en petites unités appelées clusters, chacune étant supervisée par un cluster head responsable de la coordination des données et de l'agrégation. L'algorithme Firefly, une méta-heuristique inspirée par le clignotement des lucioles, est utilisé pour optimiser la sélection des clusters head en tenant compte de la distance, de l'énergie résiduelle et des délais des nœuds capteurs dans le réseau. Il a été conçu pour maximiser l'efficacité énergétique et la durée de vie des nœuds en sélectionnant de manière optimale les clusters head. L'article suggère l'utilisation de l'algorithme Firefly avec une randomisation cyclique pour choisir le meilleur cluster head. Cette approche améliore les performances du réseau par rapport à d'autres algorithmes conventionnels.

### **Le protocole DCEMRA**

L'article [43] propose une nouvelle technique de routage multi-sauts économe en énergie et contrainte par le délai, appelée Delay Constrained Energy-efficient Multi-hop Routing Algorithm (DCEMRA), pour relever les défis des RCSF. Cette solution repose sur une approche de clustering distribuée, intégrant des agents intelligents pour former des clusters équilibrés et

---

5. DPD : Delayed Packet Dropping

6. NEB : Node Energy Balancing

déterminer des chemins de routage optimaux en tenant compte de la consommation d'énergie, du délai de bout en bout et de la distance. En utilisant l'algorithme de recherche en profondeur (DFS<sup>7</sup>), le DCEMRA parvient à trouver des routes optimales entre la source et la destination, tout en assurant un équilibre entre la consommation d'énergie et le délai. La méthode se distingue par son adaptation dynamique des clusters head, favorisant ainsi une prolongation efficace de la durée de vie du réseau, assurant ainsi des performances accrues en termes de qualité de service. En intégrant des règles pour gérer les surcharges et en favorisant une communication intra et inter-cluster optimale.

### **Un schéma à faible duty cycle tolérant aux délais**

L'article [44] présente une approche novatrice pour les RCSF à faible duty cycle, axée sur un schéma tolérant aux délais. En mettant en œuvre des duty cycles réduits, une stratégie de diversité des itinéraires, et une gestion judicieuse des délais, l'objectif principal est d'améliorer l'efficacité énergétique, la fiabilité, et les performances globales du réseau. Deux stratégies de transfert de données sont proposées, l'une privilégiant un chemin énergétiquement optimal (EEC), et l'autre favorisant un chemin optimal en termes de délai (EED). La diversité des itinéraires est exploitée pour garantir une latence probabiliste, tout en améliorant l'efficacité énergétique à travers ces divers itinéraires. Le processus d'établissement du chemin de routage met en lumière une technique spécifique visant à estimer les quantiles de délai ainsi que les coûts énergétiques (EEC et EED) à chaque nœud du RCSF, permettant des économies d'énergie opportunistes.

### **Le protocole DADF**

L'article [45] présente une solution visant à améliorer l'efficacité des RCSF fonctionnant avec des cycles de travail, où les nœuds capteurs alternent entre des périodes actives et de veille pour économiser de l'énergie. Il introduit une approche de fusion de données consciente du délai (DADF<sup>8</sup>), dont l'objectif est de réduire le délai de bout en bout tout en minimisant la consommation d'énergie. Le DADF se compose de deux phases principales : la Fusion de Données Hiérarchique (HDF<sup>9</sup>) et la Sélection du Nœud de Transfert (FNS<sup>10</sup>). Contrairement

---

7. DFS : Depth First Search

8. DADF : Delay-Aware Data Fusion

9. HDF : Hierarchical Data Fusion

10. FNS : Forwarding Node Selection

aux approches traditionnelles, le HDF est conçu pour opérer au niveau de la source, réalisant la déduplication et l'élimination des données incohérentes avant la transmission à la station de base. La FNS utilise un algorithme d'Apprentissage par Renforcement (RL). Chaque nœud capteur identifie de manière dynamique le meilleur nœud de transfert parmi ses voisins en fonction des cycles actifs de ces nœuds adjacents. Contrairement aux approches traditionnelles, le HDF est conçu pour opérer au niveau de la source, réalisant la déduplication et l'élimination des données incohérentes avant la transmission à la station de base. La FNS utilise un algorithme d'Apprentissage par Renforcement (RL). Chaque nœud capteur identifie de manière dynamique le meilleur nœud de transfert parmi ses voisins en fonction des cycles actifs de ces nœuds adjacents.

### **Protocole de routage basé sur la norme IEEE 802.15.4a**

L'article [46] propose une solution pour optimiser les performances des RCSF en se basant sur un protocole de routage élaboré conformément au standard IEEE 802.15.4a. L'objectif principal est d'améliorer l'efficacité en termes de délai et d'énergie au sein des RCSF en utilisant des informations sur deux sauts. La solution repose sur une fonction métrique robuste nommée Potential Relay Information (PRI), qui évalue la qualité de la liaison des nœuds voisins en prenant en compte ces paramètres : l'énergie résiduelle, la distance et le délai. Cette métrique permet de sélectionner un relais optimal garantissant une qualité de service optimale lors de la transmission des paquets vers la destination. De plus, un algorithme d'index d'état de voisinage préemptif (NST<sup>11</sup>) est la mise à jour des informations de deux sauts, offrant aux nœuds une vision à deux sauts de leur chemin de routage pour des prises de décision de transmission optimales, réduisant ainsi les délais et équilibrant le trafic du système.

### **Le protocole EETC**

L'article [47] propose le protocole EETC (Energy Efficient Tree-Clustering) comme une approche innovante pour améliorer l'efficacité de la collecte de données dans les RCSF. En intégrant la transmission multi-sauts et l'utilisation d'un puits mobile, EETC repose sur un algorithme de clustering heuristique OGENCL<sup>12</sup> proposé par les mêmes auteurs pour sélectionner de manière optimale les clusters heads à chaque itération. Cette sélection se base sur

---

11. NST : Neighborhood State Index

12. OGENCL : Optimal Generation of Clusters

des critères tels que l'énergie résiduelle des nœuds capteurs et leur distance par rapport à la station de base. L'objectif est de minimiser la consommation d'énergie du réseau, d'étendre sa durée de vie, et de respecter une contrainte de délai prédéfini pour les déplacements du puits mobile. En limitant le nombre de sauts de relais entre un nœud membre du cluster et le cluster head, le protocole EETC parvient à équilibrer la charge du réseau de manière efficace.

D'autres travaux se sont intéressés à cette collection de données par puits mobile parmi lesquels, nous pouvons citer : EDEDA et DGM2S.

Le protocole EDEDA (Energy and Delay Efficient Data Acquisition)[2] améliore le protocole EETC en optimisant le chemin du puits mobile avec un cycle Hamiltonien pour réduire la latence, en divisant le champ en cellules de grille avec des GCH (Grid Cell Head) pour équilibrer l'énergie et en proposant un remplacement de GCH pour éviter les trous d'énergie, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et la performance globale des RCSF.

Le protocole DGM2S (Data Gathering with Multi-interface Mobile Sink) [48] introduit une approche multi-objectif pour réduire à la fois la consommation d'énergie et les délais, contrairement à l'objectif unique du protocole EETC qui se concentre uniquement sur le délai de trajet du puits mobile. De plus, DGM2S permet au puits mobile d'interagir directement avec les Cluster Heads (CH) pour collecter une grande quantité de données, en prenant en compte à la fois le délai de trajet et le délai d'arrêt aux stations de sondage pour recevoir les données agrégées des CH.

### 3.4.2 Discussion

Cette section résume nos observations sur les différents protocoles examinés. La Table 3.1 présente la prise en compte, ou non, de différentes caractéristiques réseau relatives aux RCSF. De plus, la Table 3.2 expose les différentes techniques de conservation appliquées ainsi que les types de solutions utilisées pour garantir une QoS dans chaque cas. À partir de ces deux tables, nous constatons une prise en compte différenciée des diverses caractéristiques réseau considérées ainsi que des techniques de conservation appliquées.

Parmi les techniques de conservation utilisées, nous avons la mobilité du puits. En fait, l'adoption d'un tel puits mobile pour collecter ces données, plutôt que de permettre aux nœuds capteurs d'envoyer leurs données à un puits statique, s'est avérée être une solution efficace pour

Approche	Gigue	Différentiation de trafic	Équilibrage de consommation	Considération du problème du Hot-spot	Mobilité du puits
DEDA	X	X	X	X	X
SPEED	✓	X	X	X	X
FCR	X	X	✓	✓	X
DCEMRA	✓	X	✓	✓	X
DADF	X	X	X	X	X
EETC	X	X	✓	✓	✓
EDEDA	X	X	✓	✓	✓
Schéma à faible duty cycle	X	X	✓	X	X
Protocole basé sur la norme 802.15.4a	X	X	X	X	X

TABLE 3.1 – Résumé des protocoles de routage examinés.

<b>Approche</b>	<b>Techniques de conservation appliquées</b>	<b>Type de solutions appliquées pour garantir la QoS</b>
DEDA	Agrégation de données et adaptation des puissances de transmissions	Routage
SPEED	Aucune	Routage
FCR	Solution MAC (TDMA) et duty cycling	MAC et routage
DCEMRA	Agrégation de données	Traitement de données et routage
DADF	Agrégation de données et duty cycling	Traitement de données et routage
EETC	Agrégation de données et mobilité du puits	Routage et traitement de données
EDEDA	Agrégation de données et mobilité du puits	Routage et traitement de données
Schéma à faible duty cycle	Duty cycling	MAC
Protocole sur la norme 802.15.4a	Routage efficace en énergie	Routage

TABLE 3.2 – Techniques de conservation d'énergie et solutions de la garantie de la QoS dans les solutions examinées.

réduire considérablement la consommation d'énergie associée à cette collecte. Cette mobilité du puits présente divers avantages [49] :

- **Réduction de la charge énergétique** : Le puits mobile répartit la charge entre différents ensembles de nœuds capteurs en fonction de ses déplacements, atténuant ainsi les problèmes de 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 assure 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 et le débit, tout en réduisant la probabilité de perte de paquets et la latence.
- **Augmentation de la durée de vie du réseau** : En réduisant la distance entre les capteurs et le puits, et en minimisant les communications multi-sauts, la durée de vie du réseau est prolongée.
- **Gestion des réseaux épars** : Le puits mobile peut se déplacer dans différentes régions du réseau pour collecter des données, facilitant ainsi la gestion des 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.

Cependant, cette mobilité aura un impact sur la durée nécessaire à la collecte, car elle dépendra de la vitesse du puits et de la manière dont il recueille les différentes données à partir des capteurs du réseau. Dans ce contexte, il est crucial de mener cette collecte de manière efficace afin de réduire au minimum le temps nécessaire, et ainsi être en phase avec l'objectif de transmettre rapidement les données collectées en réponse à tout événement potentiel. C'est précisément dans cette optique que notre contribution est proposée, en tenant compte des avantages offerts par le puits mobile tout en prenant en considération cette contrainte de minimisation du temps de collecte.

## 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail l'état de l'art du routage en temps réel au sein des RCSF, ainsi que ses répercussions sur la QoS. En explorant les fondements de la QoS, en analysant les solutions de contrôle de la QoS dans les RCSF, et en plongeant dans l'univers des communications en temps réel, nous avons présenté les différents modèles de communication, les constituants de latence qui les influencent et nous avons mis en lumière l'importance du routage en temps réel dans divers scénarios applicatifs, allant de la surveillance de la santé aux systèmes de contrôle automobile en passant par les villes intelligentes. À travers cette exploration, nous avons également identifié les travaux connexes dans ce domaine. Cependant, notre exploration ne s'arrête pas ici. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter en détail notre propre contribution.

# Chapitre 4

## Contribution

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter en détail notre protocole proposé que nous baptisons ERRMS, acronyme de « Energy-efficient Real-time Routing Mobile-Sink based ». Nous débuterons par une description du problème à résoudre, suivi de l'exposition du modèle réseau adopté en précisant les différentes hypothèses prises en compte. Nous poursuivrons par une description brève de notre protocole, en mettant en lumière les structures de données essentielles mobilisées pour son fonctionnement optimal. Nous détaillerons également la liste et les formats des messages employés dans les échanges entre les nœuds. Nous plongerons ensuite dans la description minutieuse du fonctionnement de notre protocole, en exposant les différentes étapes et mécanismes impliqués. Ce faisant, nous présenterons en profondeur les principales interactions entre les nœuds.

### 4.2 Description du problème

Comme nous l'avons déjà mentionné dans la section 3.4.2, l'utilisation d'un puits mobile pour la collecte de données contribue significativement à prolonger la durée de vie du réseau en évitant, notamment, le problème des Hot Spots et en réduisant la charge due à la communication et à l'acheminement des données dans le réseau. La collecte des données de tous les nœuds du réseau par un puits mobile se fait généralement en déterminant certains points du terrain de déploiement ou certains nœuds du réseau comme points de rendez-vous (PR) que le

puits mobile doit visiter pour collecter les données des nœuds capteurs adjacents à ces points. De plus, la durée de la collecte dépend particulièrement du nombre de PR identifiés et du trajet que le puits doit effectuer pour les visiter tous. Cependant, l'identification de ces PR et la détermination du trajet optimal pour le puits mobile de manière à minimiser la durée de collection et aussi la charge énergétique qui peut être due à cette collection ne sont pas des tâches faciles.

Ainsi, pour trouver une solution répondant à ce problème, plusieurs aspects doivent être pris en compte :

- Identifier un nombre minimal de PR permettant de collecter les données de tous les nœuds du réseau, tout en assurant une durée de collecte réduite.
- Sélectionner les PR de manière judicieuse, afin de minimiser les distances de transmission et réduire la consommation d'énergie des nœuds capteurs.
- Déterminer le trajet que doit parcourir le puits mobile en passant par les différents PR de manière quasi optimale. En particulier, le puits mobile doit visiter chaque PR une seule fois et le chemin reliant les différents PR doit être le plus court possible.

En effet, notre solution actuelle répond à cette problématique en prenant en compte les trois aspects que nous venons de mentionner.

### **4.3 Modèle réseau**

Dans notre étude sur les RCSF, nous adoptons un modèle réseau spécifique qui structure notre travail. Ce modèle, détaillé ci-dessous, présente les principaux éléments et caractéristiques de notre configuration réseau comme suit :

- Notre réseau se compose d'un ensemble de nœuds capteurs homogènes et statiques, d'un seul nœud puits mobile et d'une station de base située en dehors de la zone de captage. on supposera que tous les nœuds sont capables de déterminer leur position géographique dans la zone de déploiement. Cette conscience de l'emplacement est essentiel pour plusieurs aspects de notre réseau, notamment la planification des déplacements du puits mobile.
- Il n'y a aucun obstacle physique entravant la communication entre l'émetteur et le récepteur.
- Le puits mobile commence son trajet depuis la station de base, se déplace vers divers

points du réseau afin de collecter des données, puis retourne à la station de base une fois sa mission accomplie pour transmettre les données collectées.

- Le puits mobile, les nœuds capteurs et la station de base sont conscients des dimensions de la zone de captage.
- La communication entre les nœuds du réseau dépend de la distance entre eux, qui doit être inférieure ou égale à la portée de communication du nœud. Cette portée de communication est souvent représentée sous la forme d'un cercle, où chaque nœud est le centre du cercle et sa portée de communication est le rayon. Ainsi, les nœuds peuvent échanger des données avec d'autres nœuds situés à l'intérieur de leur cercle de communication, permettant une diffusion efficace des informations dans le réseau. En particulier, la topologie du réseau est représentée par un graphe  $G = \{V, E\}$ , où  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  correspond à l'ensemble des sommets représentant les nœuds du réseau, et  $E$  est l'ensemble des arcs (liens) connectant ces nœuds. Cet ensemble est défini comme suit :

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

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

## 4.4 Vue d'ensemble de notre protocole

Face au problème évoqué précédemment, notre travail vise à trouver une solution optimale pour un routage en temps réel efficace en énergie. Nous nous appuyons sur le concept de la clusterisation en construisant une grille virtuelle et sur la mobilité du puits. Cette solution est mise en œuvre en suivant les étapes suivantes :

- La première phase consiste à la clusterisation du réseau, en divisant la zone de captage en plusieurs cellules formant une grille carrée. Cette division est effectuée en fonction de la portée de communication des nœuds capteurs. Ainsi, que chaque nœud de la cellule peut communiquer avec tous les autres nœuds de cette même cellule en un seul saut. Cela contribue à garantir un équilibrage de charge entre tous les nœuds du réseau.
- Chaque cellule de la grille est considérée comme un cluster, où l'un de ses nœuds capteurs est élu comme cluster-head (CH), Cela se base sur la distance séparant chaque membre du cluster du barycentre de l'ensemble des nœuds de ce cluster et sur l'éner-

gie résiduelle de ces nœuds. Le rôle de ce dernier est la collecte et l'agrégation des données reçues périodiquement de ses membres, qu'il transmet ensuite au nœud puits mobile. L'élection du CH de chaque cellule est maintenue périodiquement en choisissant d'autres nœuds capteurs comme CH, afin d'équilibrer la consommation d'énergie des nœuds et d'éviter la mort précoce des nœuds qui peut causer l'apparition de trous énergétiques. Cela contribue à prolonger la durée de vie du réseau.

- Après l'élection des CH pour tous les clusters, des points de rendez-vous sont identifiés, permettant au nœud puits mobile de collecter des données de plusieurs clusters adjacents en un seul saut. Cette stratégie réduit les distances physiques que les données doivent parcourir pour atteindre le puits mobile, ce qui diminue significativement la consommation d'énergie et les délais de transmission.
- Le nœud puits mobile commence son voyage depuis la station de base (SB) en visitant tous les PR exactement une seule fois, en suivant un chemin prédéterminé par la SB. Ce dernier termine son voyage à la SB après avoir transmis ses données collectées à elle.

## 4.5 Structures de données utilisées

Nous distinguons trois types de structures de données : celles utilisées au niveau du nœud capteur, celles utilisées au niveau du nœud puits mobile, et celles utilisées au niveau de la station de base.

### Structures de données utilisées au niveau du nœud capteur

Les structures de données suivantes sont utilisées au niveau de chaque nœud capteur  $i$  :

- $Id_i$  : correspond à l'identifiant du nœud capteur  $i$ .
- $IdCh_i$  : correspond à l'identifiant du cluster-head  $i$ .
- $Coord_i$  : ce sont les coordonnées du nœud capteur  $i$ .
- $IdCell_i$  : correspond à l'identifiant de la cellule.
- $CoordCell_i$  : ce sont les coordonnées de la cellule (le numéro de sa ligne et de sa colonne dans la grille).
- $ERes_i$  : l'énergie résiduelle du nœud capteur  $i$ .
- $IdPuits$  : correspond à l'identifiant du nœud puits mobile.

## Structures de données utilisées au niveau du nœud puits

Les structures de données utilisées au niveau du nœud puits mobile en plus de son propre identifiant et de ses propres coordonnées sont :

- $Id_{SB}$  : correspond à l'identifiant de la station de base.
- $Coord_{SB}$  : ce sont les coordonnées de la station de base.
- $List_{PR}$  : L'ensemble des points de rendez-vous que le puits mobile suit pour la collection des données.

## Structures de données utilisées au niveau de la station de base

Une SB participe au processus de détermination des PR et du trajet du puits mobile. En plus de son propre identifiant et de ses propres coordonnées, une SB utilise également  $Id_{Puits}$  et  $List_{PR}$ .

## 4.6 Liste et formats des messages utilisés

Le fonctionnement de notre protocole repose sur l'échange de différents messages de contrôle entre les nœuds du réseau. La table 4.1 résume cette liste avec le rôle de chacun et dont les détails sont données dans ce qui suit.

TABLE 4.1 – Table des messages utilisés.

Message	Description
CH_ELECTION	Utilisé par les noeuds capteurs pour déclencher le processus d'élection d'un CH.
CH_ANOUNCEMENT	Utilisé par les CH pour informer les autres membres du cluster de son rôle en tant que CH.
DATA_COLLECTION	Utilisé par le puits mobile pour demander aux CH d'envoyer les données collectées.
DATA	Utilisé par les noeuds capteurs pour envoyer les données collectées aux CH, et par les CH en réponse au message DATA_COLLECTION.
CH_REELECTION	Utilisé par les CH pour déclencher le processus de ré-élection d'un autre CH.

### **Le message CH\_ELECTION**

Ce message est émis par chaque nœud capteur au sein d'un cluster au début de chaque opération d'élection de CH. Son objectif est de permettre à chaque nœud de connaître les autres membres de son cluster ainsi que leurs informations. Un message CH\_ELECTION émis par un nœud  $i$  comprend les champs suivants :

- L'identifiant du nœud  $i$ .
- Ses propres coordonnées.
- L'identifiant de la cellule à laquelle il appartient.
- Son énergie résiduelle.

### **Le message CH\_ANNOUNCEMENT**

Ce message est diffusé par chaque CH après chaque élection, afin d'informer les autres membres du cluster de leur CH. Il contient les champs suivants :

- L'identifiant du CH.
- Ses propres coordonnées.
- L'identifiant de la cellule à laquelle il appartient.

### **Le message DATA\_COLLECTION**

Ce message est utilisé par un nœud puits mobile lorsqu'il atteint un PR pour demander aux CH de lui envoyer leurs données collectées. Il contient les deux champs suivants :

- L'identifiant du nœud puits mobile.
- Calendrier TDMA.

### **Le message DATA**

Ce message est utilisé par les nœuds capteurs pour envoyer leurs données collectées à leurs CH ou par les CH en réponse à la demande de collecte de données du puits mobile lorsqu'il atteint un PR. Il contient les champs suivants :

- L'identifiant de l'émetteur (un nœud capteur ou bien un CH).
- l'identifiant du récepteur (un CH ou bien un puits mobile).
- Les données collectées.

## Le message CH\_RE-ELECTION

Ce message est diffusé par un CH afin d'informer les autres membres du cluster que son niveau d'énergie résiduelle a atteint un seuil prédéfini, déclenchant ainsi un processus de ré-élection d'un autre CH. Il contient les trois champs suivants :

- L'identifiant du CH.
- L'identifiant de la cellule à laquelle il appartient.
- Son énergie résiduelle.

## 4.7 Description détaillée de notre protocole

Cette section présente en détail les quatre principales étapes de notre protocole : la construction de la grille, l'élection du CH, l'identification des PR, ainsi que la planification du trajet et la collecte des données. La signification des principaux symboles utilisés le long de cette description sont représentés par la table 4.2.

TABLE 4.2 – Table des symboles utilisés.

Symbole	Description
$L$	La longueur de la zone de captage.
$R_c$	La portée de communications des noeuds capteur.
$\alpha$	Le facteur d'ajustement de la grille.
$k$	Le nombre de lignes et de colonnes de la grille carrée
$a$	La longueur d'une cellule carrée.
$(p, q)$	Les coordonnées de la cellule (le numéro de sa ligne et de sa colonne).
$(x_i, y_i)$	Les coordonnées du noeud capteur $i$ .
$n$	Le nombre de noeuds capteurs dans un cluster.
$IdCell_i$	L'identifiant de la cellule à laquelle le noeud $i$ appartient.

### 4.7.1 Construction de la grille

La formation des clusters s'opère par la division de la zone de captage en plusieurs cellules d'une grille carrée correspondant à cette zone, en fonction de la portée de communication des noeuds capteurs. Cela garantit une transmission de données en un seul saut entre les noeuds

capteurs situés dans des cellules adjacentes. Ce processus de construction est illustré par l'algorithme 1.

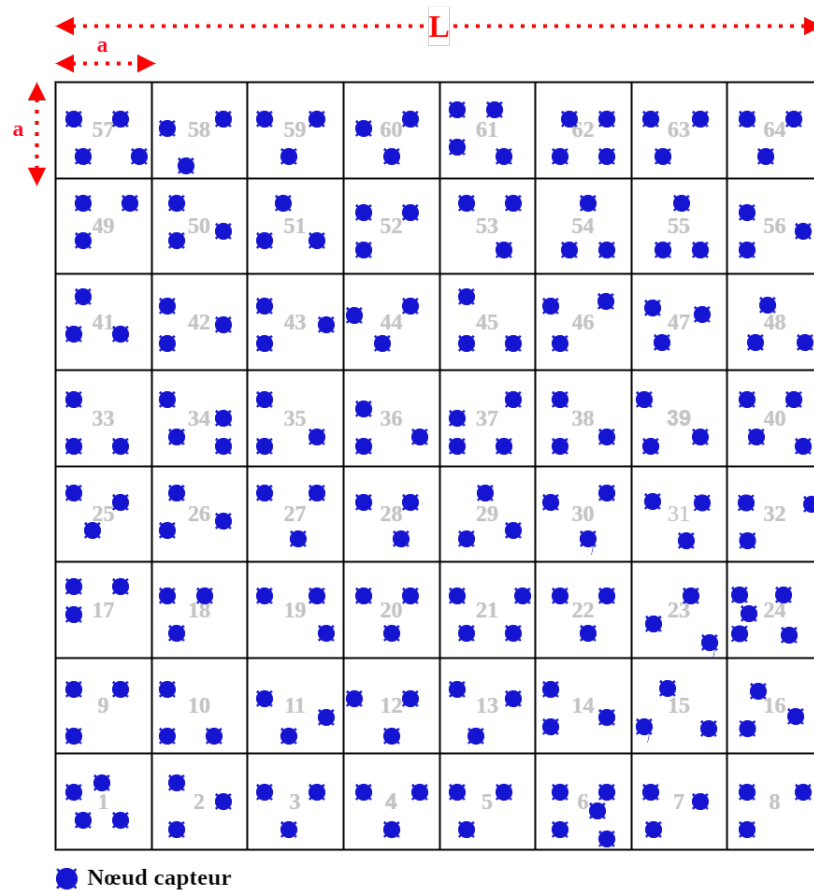


FIGURE 4.1 – Principe de construction de la grille.

Dans un premier temps, nous devons calculer le facteur d'ajustement de la grille, qui nous aide à décider le nombre de cellules qui comportera la zone de captage, selon la formule suivante [2] :

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

Où  $L$  est la longueur de la zone de captage.

En fonction de la valeur de  $\alpha$ , nous divisons la grille en  $K \times K$  cellules de forme carrée et

de taille uniforme, tel que :

$$K = \begin{cases} 4 \times 4, & \text{si } \alpha \leq 4 \\ 8 \times 8, & \text{si } 4 < \alpha \leq 8 \\ 12 \times 12, & \text{si } 8 < \alpha \leq 12 \\ 16 \times 16, & \text{si } 12 < \alpha \leq 16 \\ \dots & \end{cases}$$

Maintenant, nous pouvons calculer la longueur  $a$  du côté d'une cellule en utilisant la formule suivante :

$$a = \frac{L}{K} \quad (4.3)$$

Après la construction de la grille comme illustré dans la figure 4.1, chaque nœud capteur doit déterminer la cellule de la grille à laquelle il appartient, et donc l'identifiant de cette cellule  $IdCell_i$  en fonction de ses propres coordonnées, de la manière suivante [2] :

$$IdCell_i = (p - 1) * k + q \quad (4.4)$$

Où  $p = \lceil \frac{y_i}{a} \rceil$  et  $q = \lceil \frac{x_i}{a} \rceil$ .

---

**Algorithm 1:** Processus de construction de la grille

---

```

1 procédure Construction de la grille(L, Rc)
2   | Calculer le facteur d'ajustement de la grille en utilisant la formule 4.2;
3   | Déterminer la taille K*K de la grille en fonction de la valeur de  $\alpha$ ;
4   | Calculer la longueur  $a$  du côté d'une cellule en utilisant la formule 4.3;
5 fin
6 /* Détermination de la cellule de la grille à laquelle chaque nœud capteur  $i$  appartient*/
7 pour chaque  $i$  avec des coordonnées  $(x, y)$  faire
8   | Le nœud  $i$  calcule l'identifiant de la cellule à laquelle il appartient selon la formule
9   | 4.4;
9 fin

```

---

## 4.7.2 Élection du CH

Après la construction de la grille, lors de la première étape, des clusters sont formés, et l'élection des CH peut maintenant être réalisée. Cette élection se fait selon le processus suivant :

- Chaque nœud capteur calcule les coordonnées du barycentre de tous les nœuds capteurs de son cluster en utilisant les informations obtenues après la diffusion des messages CH\_ELECTION, comme suit :

$$Coord_{\text{Barycentre}} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right) \quad (4.5)$$

Où  $n$  est le nombre de nœuds dans ce cluster.

- Ensuite, dans le but de réduire la distance moyenne entre les nœuds capteurs et le CH, ainsi que la puissance nécessaire pour la transmission des données, le nœud capteur le plus proche du barycentre parmi les nœuds capteurs du cluster, et dont l'énergie résiduelle n'est pas inférieure à un certain seuil  $E_{\text{seuil}}$ , sera élu comme CH, comme illustré dans la figure 4.2. Le CH élu diffuse alors un message CH\_ANNOUNCEMENT pour informer les autres membres de son nouveau rôle. Ce processus d'élection est illustré à l'aide de l'algorithme 2.

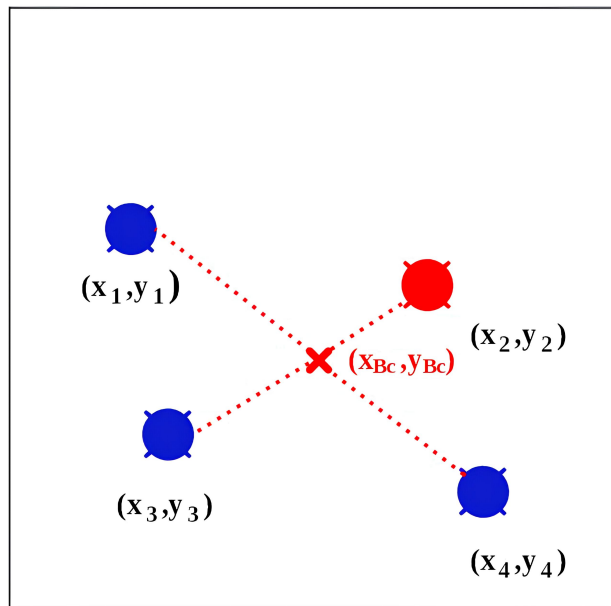


FIGURE 4.2 – La détermination du cluster-head.

- Lorsque le niveau d'énergie résiduelle d'un CH atteint  $E_{\text{seuil}}$ , il diffuse un message CH\_RE-ELECTION déclenchant un processus de réélection d'un autre CH, et ce dernier sera ignoré durant le processus de la réélection.

---

**Algorithm 2:** Processus d'élection d'un cluster-head au sein d'une même cellule

---

```
1 pour chaque noeud i du réseau faire
2   Le noeud i calcule les coordonnées du barycentre de tous les noeuds qui sont dans
   le même cluster en fonction de la formule 4.5;
3   /*  $W_i$  est l'ensemble de tous les noeuds situés dans le même cluster que i, et  $C_i$  est
   l'ensemble contenant toutes les distances séparant chaque noeud de  $W_i$  du
   barycentre */
4    $C_i \leftarrow \emptyset$ ;
5   pour chaque noeud  $j \in W_i$  faire
6     | i calcule  $\delta_{\text{barycentre},j}$ ;
7     |  $C_i \leftarrow C_i \cup \{\delta_{\text{barycentre},j}\}$ ;
8   fin
9   /* CH est le cluster-head élu */;
10   $CH = \{s | \delta_{\text{barycentre},s} = \min_{\delta \in C_i} \delta\}$ ;
11  Si  $ERes(CH) < E_{\text{seuil}}$  alors
12    | Supprimer CH de l'ensemble  $C_i$ ;
13    | Aller à 10;
14  fin
15 fin
```

---

### 4.7.3 Identification des PR

Après l'achèvement du processus d'élection des CH, le nœud puits mobile peut désormais collecter les données de tous les CH.

Dans un premier temps, des PR doivent être identifiés afin de déterminer le trajet que le nœud puits mobile va suivre pour collecter les données des CH, en partant de la SB en passant par les PR, et en terminant à la SB après avoir transmis les données collectées à celle-ci. Ces PR sont identifiés en fonction de la longueur  $a$  du côté d'une cellule en utilisant la formule suivante :

$$m = (4a(z) + 4a) - 2a < K \quad \text{où } z = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4.6)$$

où les combinaisons possibles entre les éléments de l'ensemble  $m$  seront les coordonnées des PR, comme illustré dans la figure 4.3 avec une grille de  $8 \times 8$  et de  $12 \times 12$ .



saut, ce qui présente un avantage en termes d'énergie et de délais. En rassemblant les données de plusieurs nœuds capteurs en un seul saut, le puits mobile réduit la nécessité pour chaque nœud capteur de transmettre ses données sur de longues distances, ce qui permet d'économiser considérablement l'énergie nécessaire à la transmission sans fil. De plus, en centralisant la collecte des données, le puits mobile réduit également les délais de transmission. Plutôt que d'attendre que chaque nœud capteur transmette ses données individuellement, le puits mobile peut collecter toutes les données en une seule opération, ce qui réduit le temps total nécessaire pour collecter les données de l'ensemble du réseau.

---

**Algorithm 3:** Processus d'identification des points de rendez-vous

---

```

1 /* SB correspond à la station de base */
2 /* ListPR est un ensemble contenant tous les PR identifiés */
3 ListPR ← ∅;
4 procédure identification des points de rendez-vous (a) :
5   le SB identifie les points de rendez-vous PR en utilisant la formule 4.6;
6   pour chaque x dans m faire
7     pour chaque y dans m faire
8       | ListPR ← ListPR ∪ {(x,y)};
9     fin
10  fin
11 fin

```

---

#### 4.7.4 Planification du trajet et collection des données

Comme mentionné dans l'étape précédente, le nœud puits mobile commence et termine son voyage depuis la SB en visitant tous les PR suivant un chemin prédéterminé.

La SB identifie l'un des cycles hamiltoniens possibles, où chaque PR est visité une seule fois durant le trajet du nœud puits mobile, et cela, à partir d'un graphe connexe  $G = \{V, E\}$  modélisant le parcours et le déplacement du nœud puits mobile, comme représenté dans la figure 4.4 où :

$V = V \cup \{List_{PR}, SB\}$  est l'ensemble des sommets représentant tous les PR et la SB.

$E$  est l'ensemble des arêtes entre les sommets.

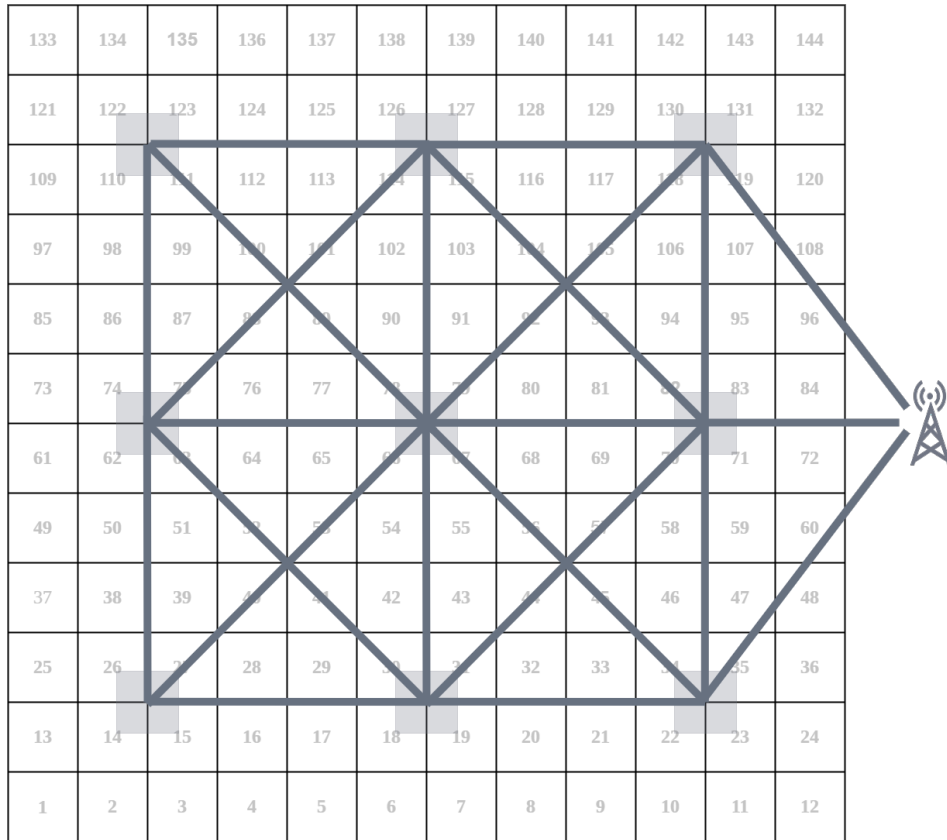


FIGURE 4.4 – Graphe connexe des PR avec une grille de  $12 \times 12$ .

Cette solution n'est pas optimale, mais plutôt une approximation proche de l'optimalité obtenue à l'aide de l'algorithme de Backtracking, souvent utilisé pour résoudre le problème des cycles hamiltoniens, qui est l'un des problèmes NP-complets.

La collecte des données par un nœud puits sera périodique en suivant l'un des cycles hamiltoniens déterminé par la SB. Lorsque le nœud puits mobile atteint un PR, il diffuse un message DATA\_COLLECTION pour demander aux CH de lui envoyer leurs données collectées, et ces derniers lui répondent par un message DATA qui contient leurs données agrégées. Ce processus est bien illustré dans la figure 4.5.

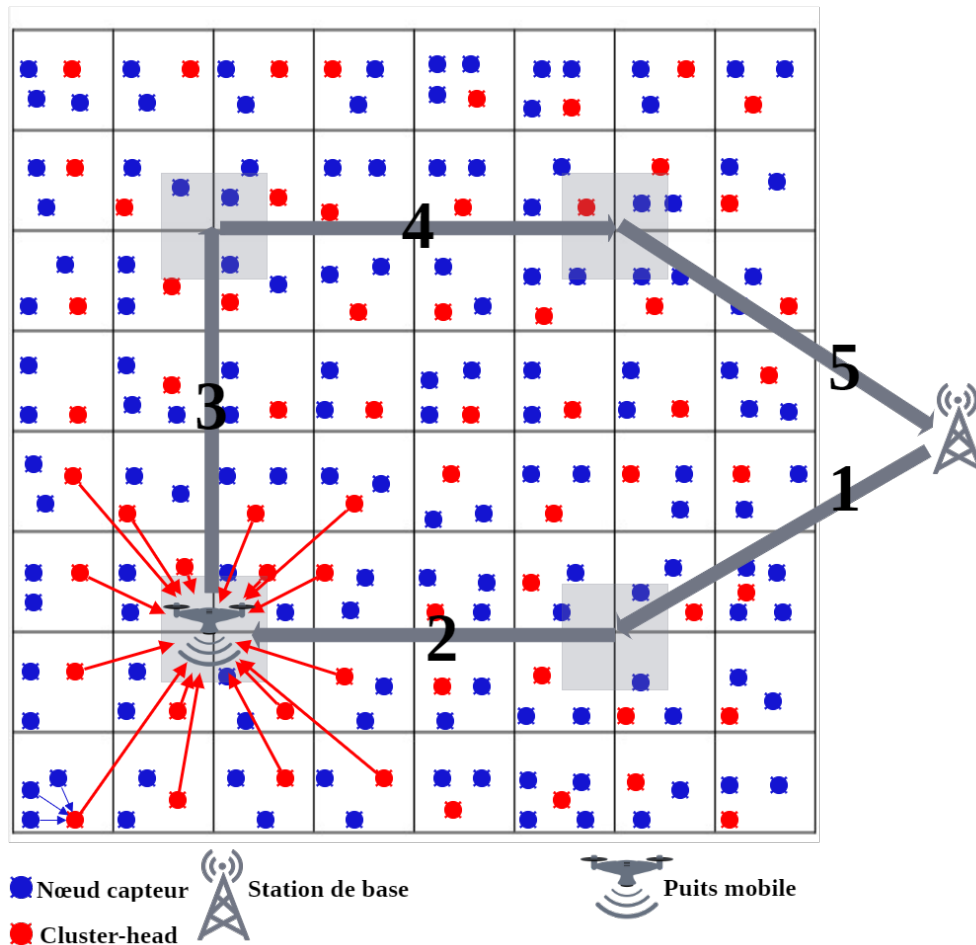


FIGURE 4.5 – La planification du trajets et collection des données.

---

**Algorithm 4:** Processus de collection de données

---

```

1 /* SB correspond à la station de base*/;
2 /*ListPR est l'ensemble des PR identifiés */;
3 procédure Planification du trajet(SB, ListPR) :
4   la SB dessine un graphe connexe  $G = \{V, E\}$  où  $V = V \cup \{List_{PR}, SB\}$  et  $E$  est
5   l'ensemble des arêtes entre les sommets;
6   la SB identifie l'un des cycles hamiltoniens possibles;
7   Le nœud puits mobile commence son voyage en suivant le cycles hamiltoniens
8   identifié par la SB;
9 fin
10 procédure Collection de données :
11   pour chaque nœud capteur  $i$  faire
12     envoyer les données collectées au CH de son cluster;
13   fin
14   pour chaque nœud CH faire
15     envoyer un message DATA en réponse au message DATA_COLLECTION;
16   fin
17 fin
  
```

---

## 4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail notre protocole proposé ERRMS, en couvrant tous les aspects pertinents. Nous avons commencé par aborder la définition précise du problème et la présentation du modèle réseau adopté. Ensuite, nous avons offert une vue d'ensemble de notre protocole. Par la suite, nous avons examiné les structures de données utilisées, les formats des messages échangés, et les étapes de fonctionnement nécessaires à la mise en œuvre efficace de notre protocole. Après avoir achevé cette étape, nous nous tournerons désormais vers la validation de notre proposition. Dans le prochain chapitre, nous présenterons les résultats de nos simulations, qui permettront de confirmer l'efficacité et la pertinence de notre protocole ERRMS.

# Chapitre 5

## Validation

### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le processus de validation de notre protocole ERRMS à travers des simulations réalisées avec le simulateur NS-3. Nous avons intégré notre propre protocole, ainsi que le protocole EDEDA, dans le simulateur NS-3 à des fins de comparaison. Nous commençons ce chapitre par une brève description du simulateur NS-3. Nous détaillons la méthodologie de simulation suivie, en mettant en lumière les paramètres spécifiques adoptés pour mener nos expérimentations. Enfin, nous présentons les résultats de nos simulations sous forme d'instantanés et de courbes, accompagnés d'une discussion approfondie sur ces résultats.

### 5.2 Simulateur NS-3

NS-3 [1] est un simulateur open source des réseaux informatiques sous licence GNU GPLv2. Il présente une plate-forme flexible et réaliste pour le développement de nouveaux protocoles et l'évaluation de leurs performances. NS-3 adopte une architecture fondée sur un ensemble de bibliothèques modulaires, permettant ainsi aux utilisateurs de composer leurs configurations de simulation en combinant ces bibliothèques selon leurs besoins spécifiques. Cette modularité renforce la réutilisabilité du code, offrant aux utilisateurs la possibilité d'économiser du temps en réemployant des modules déjà existants dans différentes simulations et projets. NS-3 prend également en charge le développement de scripts en C++ ou en Python, offrant ainsi une adaptabilité 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 ou la charge du réseau en temps réel pendant la simulation.

L'intégration de nouveaux protocoles dans NS-3 et leur simulation se fait selon le processus suivant :

- Tout d'abord, il faut implémenter le nouveau protocole ou la solution envisagée en utilisant le langage python ou C++, qui est celui 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.
- Une fois l'implémentation du protocole réalisée, il faut décrire le scénario de simulation souhaité à l'aide de fichiers de configuration écrits en langage Python ou en langage C++. Ces fichiers de configuration permettent de définir les paramètres de simulation désirés, 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.
- Une fois le scénario de simulation configuré, il est possible d'utiliser l'outil NetAnim pour visualiser graphiquement le déroulement de la simulation.
- Une fois la simulation terminée, 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 protocole ERRMS ainsi que du protocole EDEDA et leurs simulations ont été réalisées en langage C++ en suivant le même processus.

### **5.3 Méthodologie**

Dans le but de valider notre proposition, nous avons intégré dans un premier temps notre protocole ERRMS dans le simulateur NS-3. Nous avons également intégré le protocole EDEDA, qui repose sur le même principe de clusterisation en construisant une grille carrée virtuelle et sur la mobilité du puits pour la collection de données, à des fins de comparaison.

### 5.3.1 Paramètres de simulation

Après cette intégration, nous avons réalisé plusieurs expérimentations pour obtenir les résultats souhaités. Les paramètres de simulation adoptés sont résumés dans le tableau 5.1. Nous avons réalisé nos simulations avec différents nombres de nœuds capteurs (de 100 à 300) afin d'observer les variations de la consommation d'énergie et de la durée de vie du réseau. De plus, nous avons utilisé des terrains de dimensions variables pour analyser les changements de délais de collecte de données par le puits mobile. D'autres paramètres de simulation, qui étaient fixes, ont également été pris en compte lors de toutes les simulations réalisées.

TABLE 5.1 – Paramètres de simulation.

Paramètre	valeur
Dimensions du terrain (L×L)	200×200, 240×240, 400×400, 500×500 et 580×580
Nombre de nœuds capteurs	100-300
Portée de communication (m)	100
Énergie Résiduelle initiale	0.2 J
Taille du paquet	512 bytes
Vitesse du puits mobile	10 m/s
Nombre de tours du puits	10
Nombre de rounds de collection de données	10
Durée de séjour du puits dans un PR	2 s
Durée entre deux tours	10 minutes
Durée de simulation	3 heures
$E_{elec}$	50 nJ/bit
$E_{mp}$	0.0013 pJ/bit/m <sup>4</sup>
$E_{Fs}$	10 pJ/bit/m <sup>2</sup>
MAC	IEEE 802.11.b

### 5.3.2 Modèle énergétique

Afin d'analyser la consommation d'énergie dans le réseau, nous avons utilisé un modèle de dissipation d'énergie proposé dans [50], qui permet de calculer l'énergie dissipée lors de la

transmission d'un message de  $p$  bits sur une distance  $d$ , ainsi que l'énergie dissipée en recevant un message de  $p$  bits en utilisant respectivement ces deux formules :

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

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

où  $E_{elec}$  représente l'énergie par bit consommée par le capteur pour activer l'émetteur-récepteur.  $E_{Fs}$  et  $E_{mp}$  expriment respectivement la dissipation d'énergie en cas de propagation en espace libre et en conditions de multi-trajet. La propagation en espace libre se produit généralement sur des distances plus courtes, tandis que la propagation en conditions de multi-trajet se produit sur des distances plus longues, où les signaux peuvent être réfléchis et dispersés.  $d_0$  représente la valeur seuil de la distance.

Dans notre modèle, nous ignorons l'énergie dissipée lors de la perception et du traitement, car elle est moins importante que celle dissipée lors de la transmission.

### 5.3.3 Métriques de comparaison

La comparaison entre notre protocole ERRMS et EDEDA est faite sur la base des trois métriques suivantes : énergie totale consommée, durée de vie du réseau et délai de collection de données. Les détails relatifs à chaque métrique sont présentés dans les sections suivantes.

#### 5.3.3.1 Énergie totale consommée

Représente la quantité totale d'énergie consommée pendant la phase de communication, c'est-à-dire la transmission et la réception. Si *energie\_init* est l'énergie initiale d'un nœud capteur au début de la simulation et *energie\_resid* est l'énergie résiduelle d'un nœud à la fin de la simulation, que nous avons calculée en utilisant le modèle d'énergie mentionné ci-dessus, alors l'énergie totale consommée par tous les nœuds, un total de  $M$  nœuds, peut être calculée comme suit :

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^M [E_i(\text{energy\_init}) - E_i(\text{energy\_resid})] \quad (5.3)$$

### 5.3.3.2 Durée de vie du réseau

Se définit comme la durée depuis l'établissement du réseau jusqu'à ce que le premier nœud capteur ait complètement épuisé son énergie. C'est l'une des différentes définitions disponibles de la durée de vie du réseau pour les RCSF.

### 5.3.3.3 Délai de collection de données

Se définit comme le temps total nécessaire pour que le puits mobile commence son parcours depuis la station de base, visite tous les points de rendez-vous pour collecter les données, et retourne à la station de base pour livrer les données collectées. Ce délai inclut à la fois le temps de déplacement entre les points de rendez-vous et le temps de transmission des données à chaque point, qui est le temps de pause. Le délai de collection des données est donné par la formule suivante :

$$D_{\text{collection}} = \sum_{i=1}^{|\text{PR} \cup \{\text{Point de départ}\}|} \left( \frac{\delta(\text{PRL}(i), \text{PRL}(i+1))}{v} \right) + \sum_{j=1}^{|\text{PR}|} Pt_j \quad (5.4)$$

Où

$\delta$  : la distance entre deux PR.

PRL : l'emplacement des points.

$v$  : la vitesse de déplacement du puits mobile.

$Pt$  : le temps de pause dans un PR pour la collecte des données des CH.

## 5.4 Résultats et discussion

Pour démontrer l'efficacité de notre protocole, nous allons présenter les résultats obtenus en fonction des métriques de comparaison choisies comme suit :

- Nous présentons, dans un premier temps, l'impact de la densité du réseau sur la consommation d'énergie par une courbe illustrant la consommation totale d'énergie en fonction du nombre de nœuds capteurs pour les deux protocoles, ERRMS et EDEDA.
- Ensuite, Nous présentons l'impact de la densité du réseau sur sa durée de vie par une

courbe illustrant la durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds capteurs pour les deux protocoles, ERRMS et EDEDA.

- Enfin, nous démontrons la capacité de notre protocole à minimiser le délai de collecte des données par rapport à EDEDA en réduisant le nombre de points de rendez-vous et, par conséquent, la durée du trajet du nœud puits mobile.

#### 5.4.1 Énergie totale consommée

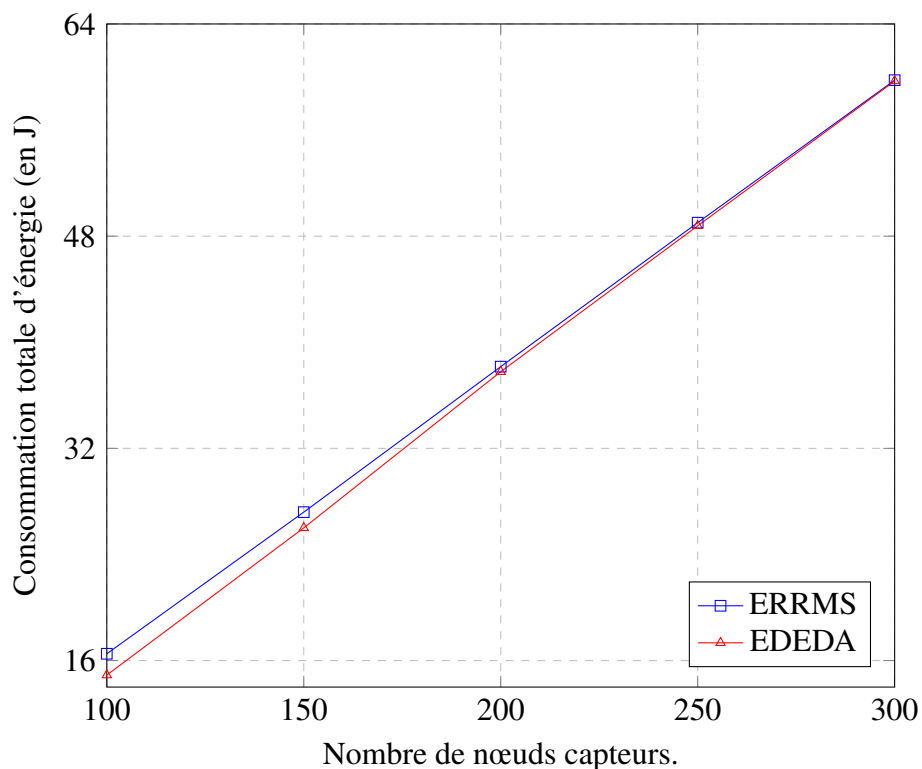
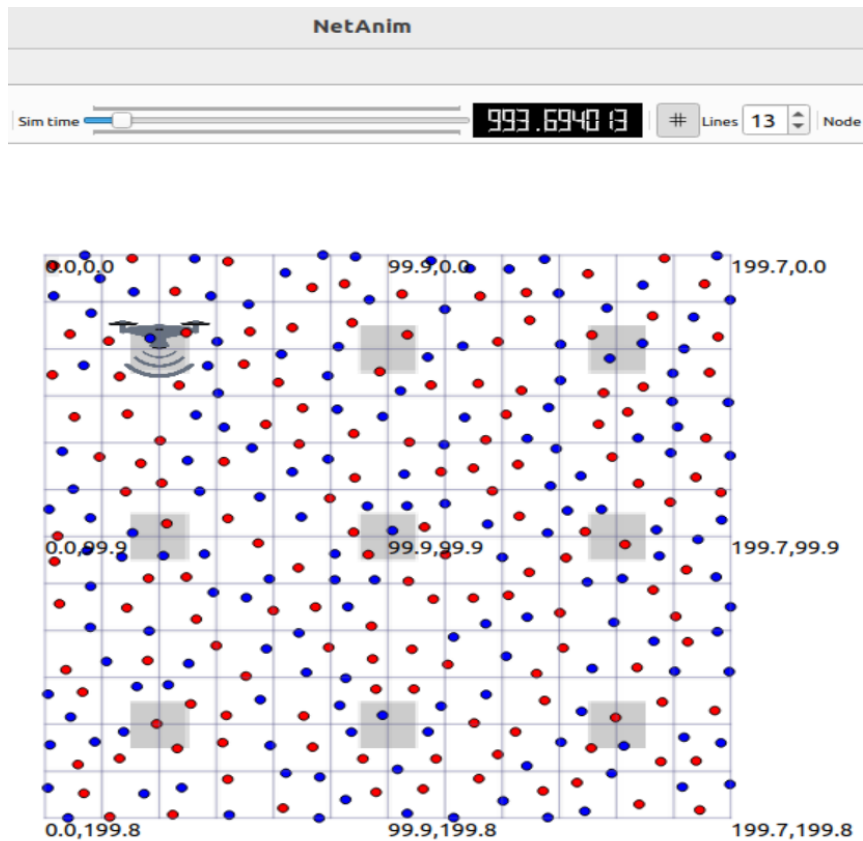


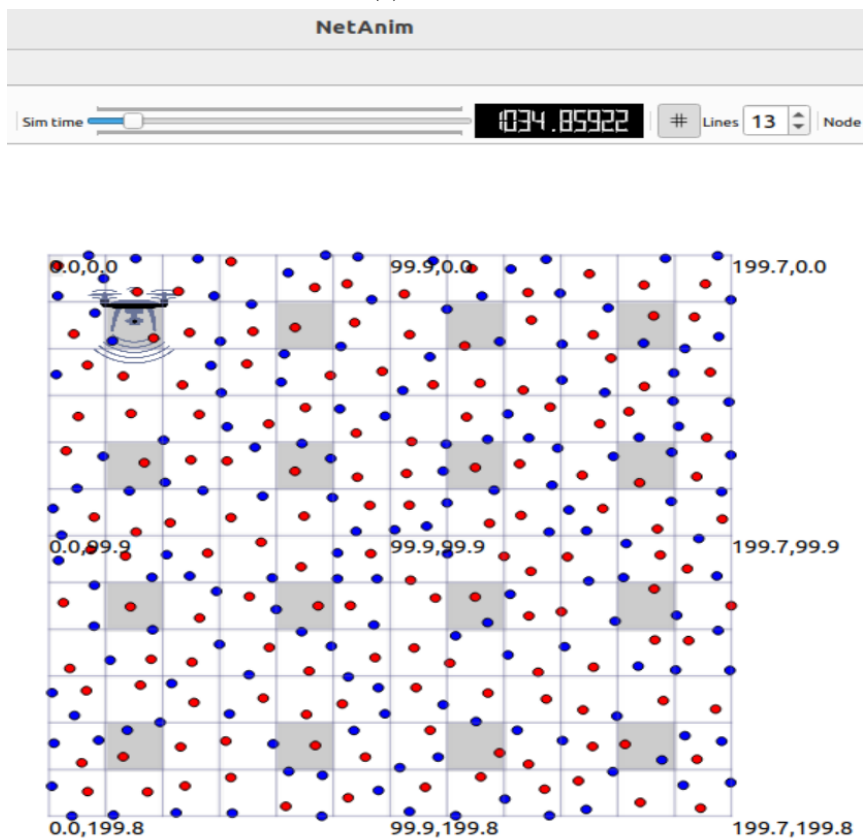
FIGURE 5.1 – Consommation totale d'énergie en fonction du nombre du noeuds capteurs

Dans cette première analyse, nous examinons l'impact de la densité du réseau sur la consommation d'énergie avec les protocoles ERRMS et EDEDA. La figure 5.1 illustre la consommation totale d'énergie en fonction du nombre de nœuds capteurs pour les deux protocoles. Nous remarquons une consommation totale pratiquement similaire, car le fonctionnement des deux protocoles est presque identique. Dans EDEDA, le CH élu est celui qui est le plus proche du centre de chaque cellule et dont l'énergie résiduelle est supérieure au seuil prédéterminé. Dans notre cas, ce CH est celui qui est le plus proche du barycentre de l'ensemble des nœuds. Étant donnée la répartition uniforme des nœuds capteurs, une élection pratiquement identique du même CH est observée dans les deux protocoles. Cela est illustré par la figure 5.2, qui présente

des instantanés de l'organisation du réseau obtenue pour chaque protocole avec les différents PR déterminés. Comme vous pouvez le constater, le CH élu, représenté en rouge, est pratiquement le même dans chaque deux mêmes cellules des deux instantanés. Cependant, il convient de noter une légère augmentation de cette consommation (négligeable) dans notre protocole. Cette augmentation s'explique par le fait que les nœuds CH dans EDEDA envoient les données sur des distances plus courtes, grâce au choix de points de rendez-vous où le nœud puits mobile collecte les données de 9 CH proches, comparativement à ERRMS qui collecte les données de 16 CH, incluant certains plus éloignés.



(a) ERRMS



(b) EDEDA

FIGURE 5.2 – Instantanés de collection de données pour les protocoles EDEDA et ERRMS. Les nœuds rouges représentent les CH, tandis que les nœuds bleus sont des membres de cluster. Les différents carrés gris correspondent aux différents PR.

## 5.4.2 Durée de vie du réseau

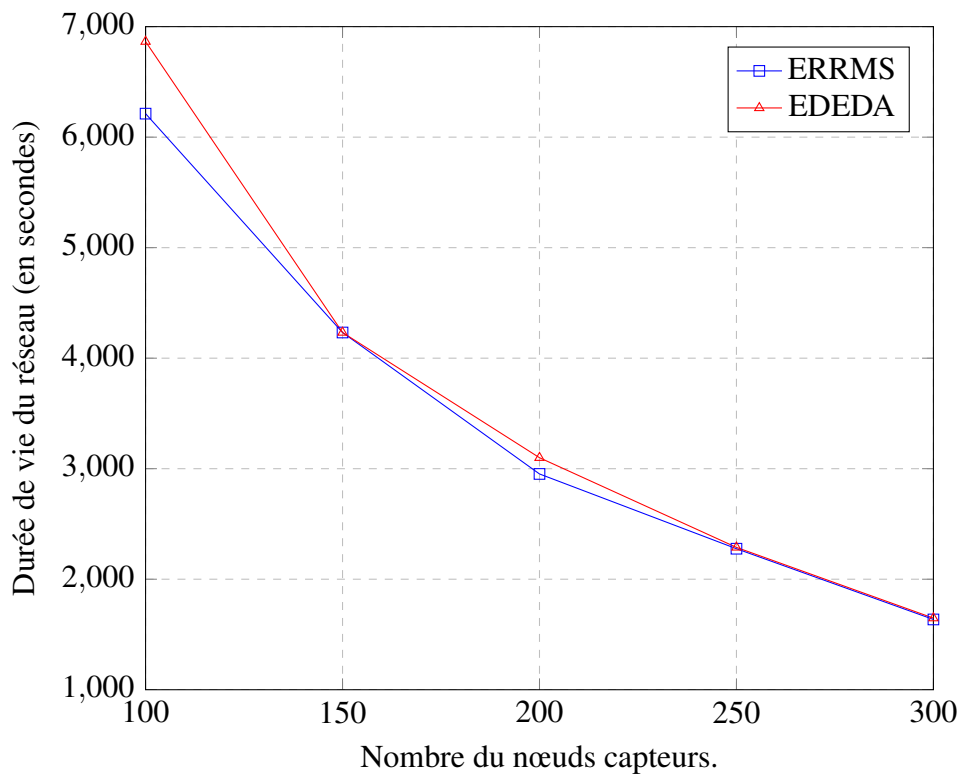


FIGURE 5.3 – Durée de vie du réseau en fonction du nombre du nœud capteur

Dans cette deuxième partie, nous examinerons l'impact de la densité du réseau sur sa durée de vie pour les protocoles ERRMS et EDEDA. La figure 5.3 montre cette durée de vie en fonction du nombre de nœuds capteurs pour les deux protocoles. Comme mentionné précédemment, la durée de vie du réseau est définie comme le temps écoulé depuis l'établissement du réseau jusqu'à ce que le premier nœud capteur ait complètement épuisé son énergie, ce qui est directement lié à la consommation d'énergie dans le réseau. Les observations faites concernant la consommation totale d'énergie s'appliquent également ici. En effet, la consommation totale d'énergie et la technique de réélection utilisées dans les deux protocoles sont pratiquement identiques.

### 5.4.3 Délai de collection de données

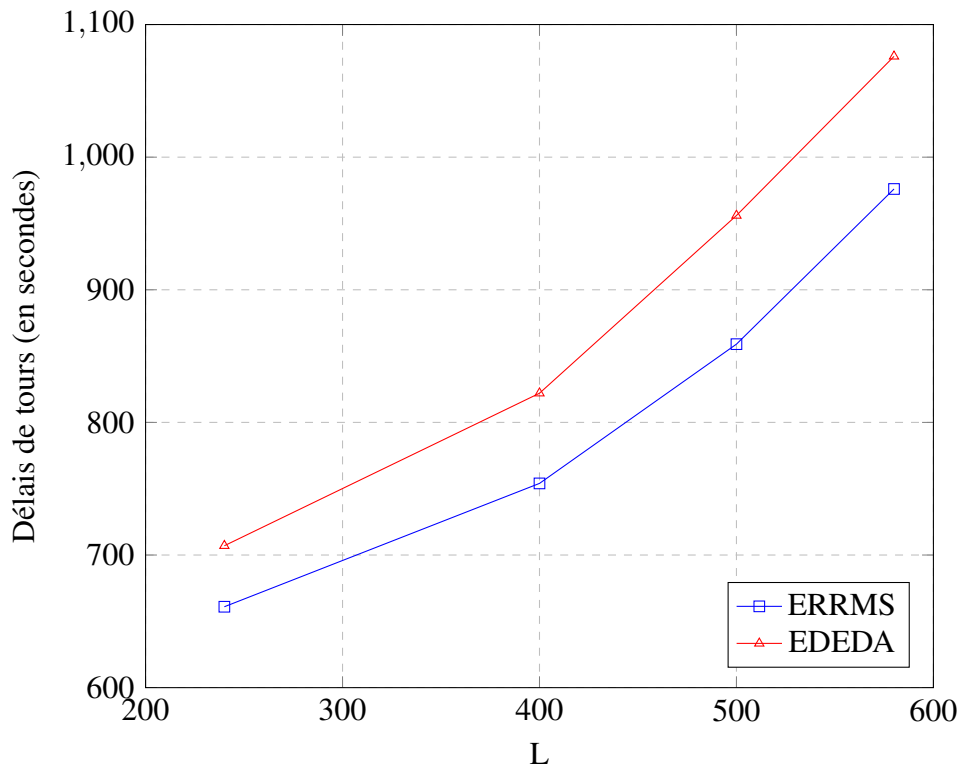


FIGURE 5.4 – Le délais de collection en fonction de L.

Dans cette dernière partie, nous nous intéressons aux performances de notre protocole concernant le délai de collecte de données. La figure 5.3 illustre le délai de collection en fonction de la longueur de la zone de captage (L), influençant la valeur du facteur d’ajustement de la grille (alpha), qui contrôle la taille de la grille ( $k \times k$ ), ainsi que le nombre de PR dans le trajet du puits mobile pour la collection des données des CH dans les protocoles EDEDA et ERRMS, comme le montre le tableau 5.2.

TABLE 5.2 – Le nombre de PR en fonction de  $\alpha$  pour les protocoles EDEDA et ERRMS.

			EDEDA		ERRMS	
Rc	L	$\alpha$	$k \times k$	Nombre de PR	$k \times k$	Nombre de PR
100	240	7	$9 \times 9$	9	$8 \times 8$	4
100	400	11	$12 \times 12$	16	$12 \times 12$	9
100	500	14	$15 \times 15$	25	$16 \times 16$	16
100	580	16	$18 \times 18$	36	$20 \times 20$	26

Avec le protocole EDEDA, le délai est plus important qu’avec ERRMS, ce qui démontre

clairement la capacité de notre protocole à minimiser le délai de collecte des données en réduisant le temps de trajet du puits mobile par la minimisation du nombre de PR par rapport à EDEDA. Cette constatation est illustrée dans la figure 5.2, présentant visuellement les résultats de simulation des deux protocoles avec une grille de même taille  $12 \times 12$ .

## **5.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé le processus de validation de notre protocole ERRMS à travers des simulations réalisées avec le simulateur NS-3. Après avoir brièvement décrit le simulateur NS-3 et détaillé notre méthodologie de simulation avec ses paramètres spécifiques, nous avons présenté les résultats obtenus ainsi que les discussions qui en découlent. Ces résultats, exprimés à travers des courbes et des instantanés, ont éclairé la performance de notre proposition en comparaison avec le protocole EDEDA. Cette simulation confirme la robustesse et l'efficacité de notre protocole ERRMS dans les RCSF en termes de routage en temps réel et d'efficacité énergétique, dans le but de prolonger la durée de vie du RCSF.

# Chapitre 6

## Conclusion générale

### 6.1 Contributions

Dans ce projet de fin d'études, notre intérêt s'est porté sur le routage en temps réel dans les RCSF avec pour objectif de prolonger la durée de vie du réseau. L'idée de base consiste à trouver un équilibre optimal entre la consommation d'énergie et le délai de transmission, deux paramètres étroitement liés mais souvent opposés. En effet, réduire la consommation d'énergie peut parfois entraîner une augmentation du délai de transmission, et vice versa. Cet équilibre délicat est essentiel pour garantir un routage en temps réel efficace en énergie, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie opérationnelle des RCSF.

Pour répondre à cette problématique, nous avons proposé dans ce travail un nouveau protocole que nous avons baptisé ERRMS comme abréviation de « Energy-efficient Real-time Routing Mobile-Sink based ». Ce protocole adopte pour la collection des données une approche de mobilité avec une stratégie de clusterisation fondée sur la portée de communication des nœuds, réduisant ainsi la consommation d'énergie en minimisant le nombre de messages envoyés dans le réseau. Chaque cluster est dirigé par un CH chargé de rassembler les données avant de les transférer au puits mobile, qui collecte périodiquement les données de plusieurs clusters en un seul saut. Ce puits se déplace d'un PR à un autre sur la base d'un chemin fixe prédéterminé, commençant et se terminant à la station de base. Un nombre minimal de PR est déterminé afin de minimiser la durée de collection de ces données en minimisant la durée du trajet du puits. En fait, cette détermination de PR constitue un défi majeur dans l'approche de

mobilité. L'élection de CH se fait périodiquement sur la base de deux critères : la distance de chaque membre du cluster par rapport au barycentre de l'ensemble des nœuds de ce cluster et sur l'énergie résiduelle de ces nœuds, assurant ainsi un équilibre énergétique. Ce processus garantit un routage en temps réel économe en énergie, prolongeant ainsi la durée de vie du réseau tout en optimisant l'efficacité des transmissions.

Pour la validation de notre protocole, nous avons procédé par simulation à l'aide du simulateur NS-3. Nous avons intégré ERRMS et aussi le protocole EDEDA au sein de ce simulateur. Nous avons mené diverses expérimentations. Les résultats obtenus sous forme de courbes et d'instantanés ont montré la capacité de notre protocole à prolonger la durée de vie du RCSF en minimisant la consommation d'énergie et à assurer une communication en temps réel.

## 6.2 Critique du travail

Comme mentionné précédemment, notre travail porte sur la minimisation de la consommation d'énergie pour prolonger la durée de vie du réseau, tout en assurant une collection rapide des données. Il est essentiel d'avoir un mécanisme approprié pour garantir la réception et le traitement corrects des messages de contrôle, car l'absence de fiabilité des communications peut entraîner des décisions erronées basées sur des informations incorrectes sur l'état des nœuds ou des données, compromettant ainsi les performances globales du réseau. Cette fiabilité n'a pas été prise en compte dans notre travail.

D'un autre côté, lors de la construction d'une grille de cellules carrées pour la clusterisation, nous nous sommes uniquement basés sur la portée de communication, ce qui peut entraîner des inégalités dans la répartition des nœuds, certains groupes de cellules ayant plus de nœuds que d'autres. Lors du choix des CH, les cellules avec moins de nœuds peuvent voir leur énergie être utilisée plus rapidement, créant ainsi des "trous d'énergie" et compromettant la connectivité du réseau. Cependant, nous n'avons pas pris en compte le cas où certaines cellules ont un nombre de membres plus petit que d'autres, ce qui nécessiterait la mise en place d'une stratégie dédiée pour assurer une répartition équilibrée des nœuds et éviter une dégradation des performances du réseau.

De plus, bien que nous ayons réussi à minimiser le délai de collecte des données en réduisant le nombre de points de rendez-vous dans le trajet fixe du puits mobile, la réduction des

délais dans les RCSF reste un sujet d'intérêt majeur pour de nombreux chercheurs, notamment en raison des exigences croissantes des applications en temps réel.

### **6.3 Travaux futurs et perspectives**

Dans le cadre de nos futures recherches et perspectives, en nous appuyant sur les critiques présentées, nous envisageons d'améliorer notre travail en proposant une stratégie robuste pour garantir la réception et le traitement corrects des messages de contrôle, afin d'éviter toute décision erronée résultant de données incorrectes.

Nous chercherons également des solutions pour améliorer l'équité dans la répartition des nœuds lors de la clusterisation.

De plus, nous continuerons à travailler sur la minimisation des délais de collection des données pour une communication en temps réel, soit en réduisant davantage le nombre de points de rendez-vous, soit en ajoutant d'autres nœuds puits mobiles.

# Références

- [1] Ns-3, site officiel. [Online]. Available : <https://www.nsnam.org/docs/tutorial/html>
- [2] 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*, 2023. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1007/s12652-022-03729-9>
- [3] R. Alcivar Espin and J. D. Alcivar Espin, “FROM THE INTERNET OF THINGS (IOT) TO THE INTERNET OF EDUCATION (IOED) : THE DEFINITION AND EMPIRICAL MODEL OF IOED.” [Online]. Available : <https://www.researchgate.net/publication/323889822>
- [4] k. Lakhwani, H. kumar Gianey, J. kofi Wireko, and K. kant Hiran, *Internet of Things (IoT) Principales, Paradigms and Application of IoT*.
- [5] K. Gulati, R. Sarath Kumar Boddu, D. Kapila, S. L. Bangare, N. Chandnani, and G. Saravanan, “A review paper on wireless sensor network techniques in internet of things (IoT).” [Online]. Available : <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.067>
- [6] M. Naidja, “Auto-adaptation dans les RCSF hétérogènes pour des e-applications.”
- [7] M. B. BENMAHDI, “Routage intelligent dans les réseaux de capteurs à grande échelle.”
- [8] M. A. Jamshed, Q. H. Abbasi, and M. A. Imran, “Challenges, applications, and future of wireless sensors in internet of things.” [Online]. Available : <https://www.ieee.org/publications/rights/index.htm>
- [9] B. ROMDHANI, “Exploitation de l’hétérogénéité des réseaux de capteurs et

- d'actionneurs dans la conception des protocoles d'auto-organisation et de routage.” [Online]. Available : <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2012ISAL0066/these.pdf>
- [10] D. Falko, *Self-Organization in Sensor and Actor Networks*.
- [11] L. DEYU, W. QUAN, M. WEIDONG, X. JIANFENG, and Z. ZHIQIANG, “A survey on energy-efficient strategies in static wireless sensor networks.” p. 38. [Online]. Available : <http://eprints.whiterose.ac.uk/166666/>
- [12] S. SGHAIER, “Techniques de conservation de l'énergie dans les réseaux de capteurs mobiles : découverte de voisinage et routage.” [Online]. Available : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01335097>
- [13] A. Giuseppe, C. Marco, D. F. Mario, and P. Andrea, “Energy conservation in wireless sensor networks,” p. 32. [Online]. Available : [www.elsevier.com/locate/adhoc](http://www.elsevier.com/locate/adhoc)
- [14] N. Christos, K. Dionisis, and V. Georgios, “Energy efficient routing in wireless sensor networks,” p. 65.
- [15] K. El Gholami, “La gestion de la qualité de service temps-réel dans les réseaux de capteurs sans fil.” [Online]. Available : <https://theses.hal.science/tel-01158110>
- [16] M. SOUIL, “Qualite de service dans les reseaux de capteurs sans fil.” [Online]. Available : <https://theses.hal.science/tel-00919777>
- [17] B.-S. Kim, H. Park, K. H. Kim, K.-I. Kim, and D. Godfrey, “A survey on real-time communications in wireless sensor networks,” p. 14. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1155/2017/1864847>
- [18] C. Caccamo and L. Y. Zhang, “The capacity of implicit edf in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 15th Euromicro Conference on Real-Time Systems, ECRTS 2003*, prt, July 2003, pp. 267–275.
- [19] W. Shen, T. Zhang, M. Gidlund, and F. Dobslaw, “Sas-tdma : a source aware scheduling algorithm for real-time communication in industrial wireless sensor networks,” vol. 19, no. 6, pp. 1155–1170, 2013.
- [20] T. Watteyne, I. Augé-Blum, and S. Ubéda, “Dual-mode real-time mac protocol for wire-

- less sensor networks : A validation/simulation approach,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Integrated Internet Ad hoc and Sensor Networks, fra*, 2006, pp. 1–10.
- [21] R. M. Kieckhafer, “Hard real-time wireless communication in the northern pierre auger observatory,” in *Proceedings of the 17th IEEE-NPSS Real Time Conference, RT10*. prt, May 2010.
- [22] D. D. Guglielmo, S. Brienza, and G. Anastasi, “Ieee 802.15.4e : A survey,” vol. 88, pp. 1–24, 2016.
- [23] *Industrial Communication Networks - Wireless Communication Network and Communications Profiles - WirelessHART*, IEC Type 20 communication network, 2010, additional Communication Profile CP 9/2 in addition to IEC 61784-1 CPF 9.
- [24] E. Kyriakakis, M. Lund, L. Pezzarossa, J. Sparsø, and M. Schoeberl, “A time-predictable open-source ttethernet end-system,” *Journal of Systems Architecture*, vol. 106, 2020, this is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). [Online]. Available : <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2020.101771>
- [25] R. Matischek, T. Herndl, C. Grimm, and J. Haase, “Realtime wireless communication in automotive applications,” in *Proceedings of the 14th Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition, DATE 2011*. fra, March 2011, pp. 1036–1041.
- [26] D. Abdeli, S. Zelit, and S. Moussaoui, “Rth-mac : A real-time hybrid mac protocol for wsn,” in *Proceedings of the 11th International Symposium on Programming and Systems, ISPS 2013*, April 2013, pp. 153–162.
- [27] J. Brown and U. Roedig, “Ginlite - a mac protocol for real-time sensor networks,” in *Proceedings of IEEE European Workshop on Wireless Sensor Networks*, December 2012.
- [28] G. Ali, K. H. Kim, and K.-I. Kim, “Adaptive tdma scheduling for real-time flows in cluster-based wireless sensor networks,” vol. 13, no. 2, pp. 475–492, 2016.
- [29] E. Felemban, C.-G. Lee, and E. Ekici, “Mmspeed : multipath multi-speed protocol for qos guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks,” vol. 5, no. 6, pp.

738–753, 2006.

- [30] L. Zhao, B. Kan, Y. Xu, and X. Li, “Ft-speed : A fault-tolerant, real-time routing protocol for wireless sensor networks,” in *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2007*. chn, September 2007, pp. 2531–2534.
- [31] A. A. Ahmed, “An enhanced real-time routing protocol with load distribution for mobile wireless sensor networks,” vol. 57, no. 6, pp. 1459–1473, 2013.
- [32] Y. Xu, F. Ren, T. He, C. Lin, C. Chen, and S. K. Das, “Realtime routing in wireless sensor networks : A potential field approach,” vol. 9, no. 3, p. Article ID 2480738, 2013.
- [33] S. Rachamalla and A. S. Kancherla, “A two-hop based adaptive routing protocol for real-time wireless sensor networks,” vol. 5, no. 1, p. Article number 1110, 2016.
- [34] Y.-Q. Song, “Garantir la qualité de service temps réel : ordonnancement et gestion de files d’attente,” in *5ème Ecole d’été Temps Réel - ETR 2007*, Irccyn, Nantes, France, 2007, pp. 257–275. [Online]. Available : <https://inria.hal.science/inria-00189904>
- [35] K. Kim, “Evaluating an (m, k)-firm deadline real-time stream based on a reliable transport protocol in wireless sensor networks,” vol. 10, no. 2, pp. 129–134, 2012.
- [36] P. Jiang, Q. Huang, J. Wang, X. Dai, and R. Lin, “Research on wireless sensor networks routing protocol for wetland water environment monitoring,” in *Proceedings of the First International Conference on Innovative Computing, Information and Control - Volume I (ICICIC’06)*, Beijing, China, 2006, pp. 251–254.
- [37] X. Li, S. Yan, and A. Nayak, “Localized delay-bounded and energy-efficient data aggregation in wireless sensor and actor networks,” p. 15.
- [38] H. Chen, “End-to-end delay analysis and measurements in wireless sensor networks.”
- [39] T. He, J. A. Stankovic, C. Lu, and T. Abdelzaher, “Speed : A stateless protocol for real-time communication in sensor networks,” *Department of Computer Science, University of Virginia; Department of Computer Science & Engineering, Washington University in St Louis*, {tianhe, stankovic, zaher}@cs.virginia.edu, lu@cs.wustl.edu.

- [40] Y. Zhou, E. C.-H. Ngai, M. R. Lyu, and J. Liu, "Power-speed : A power-controlled real-time data transport protocol for wireless sensor-actuator networks," 2007.
- [41] M. Aissani, S. Bouznad, A. Fareb, and M. Laidoui, "Ea-speed : Energy-aware real-time routing protocol for wireless sensor networks," *Int. J. Information and Communication Technology*, vol. 5, no. 1, 2013, computer Science Unit, Ecole Militaire Polytechnique (EMP), P.O. Box 17, Bordj-El-Bahri, 16111, Algiers, Algeria.
- [42] A. Sarkar and T. S. Murugan, "Cluster head selection for energy efficient and delay-less routing in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, 2019, published online : 15 July 2017. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1007/s11276-017-1558-2>
- [43] M. Selvi, P. Velvizhy, S. Ganapathy, H. Khanna Nehemiah, and A. Kannan, "A rule-based delay-constrained energy-efficient routing technique for wireless sensor networks," *Cluster Computing*, vol. 22, 2019. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1007/s10586-017-1191-y>
- [44] S. Singh, V. Anand, and P. K. Bera, "A delay-tolerant low-duty cycle scheme in wireless sensor networks for iot applications," *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 2023. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2023.04.005>
- [45] P. K. Donta, T. Amgoth, and C. S. R. Annavarapu, "Delay-aware data fusion in duty-cycled wireless sensor networks : A q-learning approach," *Sustainable Computing : Informatics and Systems*, 2021. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100642>
- [46] E. D. Tita, W.-P. Nwadiugwu, J. M. Lee, and D.-S. Kim, "Real-time optimizations in energy profiles and end-to-end delay in wsn using two-hop information," *Computer Communications*, 2021. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.02.007>
- [47] S. Chowdhury and C. Giri, "Eetc : Energy efficient tree-clustering in delay constrained wireless sensor network," *Wireless Personal Communications*, 2019. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06559-9>
- [48] S. Azar, A. Avokh, J. Abouei, and K. N. Plataniotis, "Energy- and delay-efficient algo-

rithm for large-scale data collection in mobile-sink wsns,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 7, p. 16, April 2022.

- [49] 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, 2022. [Online]. Available : <https://link.springer.com/10.1007/s11227-022-04327-4>
- [50] 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>