



N° d'ordre NNT : 2019LYSE1183

Thèse de Doctorat En Informatique

Préparée dans le cadre d'une cotutelle entre
l'Université Ferhat Abbas Sétif 1 et l'Université Claude Bernard Lyon 1

Titre

Gestion de la Mobilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil

Soutenue publiquement le 24/11/2019, par :

Sarra MESSAI

Devant le jury composé de :

Madame Nadjet KAMEL, Professeur, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie	: Présidente
Monsieur Yacine CHALLAL, Professeur, École supérieur d'Informatique (ESI), Algérie	: Rapporteur
Monsieur Congduc PHAM, Professeur des Universités, Université de Pau, France	: Rapporteur
Madame Samra BOULFEKHAR, Maître de Conférences HDR, Université A. Mira de Béjaia, Algérie	: Examinatrice
Monsieur Mohand Said HACID, Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1, France	: Examineur
Monsieur Fouzi SEMCHEDINE, Professeur, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie	: Examineur
Monsieur Adbelkamel TARI, Professeur, Université A. Mira de Béjaia, Algérie	: Examineur
Madame Hamida SEBA, Maître de Conférences HDR, Université Claude Bernard Lyon 1, France	: Directrice de thèse

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) envahissent de plus en plus notre vie. A l'ère de l'Internet des objets, ils sont utilisés dans les domaines nécessitant l'observation du monde physique et la collecte de données. Toutefois, beaucoup d'obstacles inhérents aux spécificités des RCSFs doivent être surmontés avant de pouvoir atteindre la maturité de cette technologie. Parmi ces entraves, la limitation des ressources telles que l'énergie, la puissance de calcul, la bande passante et l'espace mémoire des capteurs. Dans cette thèse, nous nous intéressons à la gestion de la mobilité comme solution permettant d'améliorer les performances du réseau en termes de consommation d'énergie et d'optimisation de la collecte de données.

Un réseau de capteurs sans fil mobile est un réseau dans lequel au moins la station de base est mobile. Nous nous sommes tout d'abord intéressés au cas où seule la station de base est mobile. Dans ce cadre, nous avons proposé une organisation du réseau de capteurs qui tire parti de la mobilité de la station de base pour optimiser la collecte de données tout en réduisant l'énergie dissipée par les capteurs. L'organisation proposée s'appuie sur une architecture en grille et un algorithme optimisé de déplacement de la station de base pour visiter les cellules de la grille et collecter les données. Nous avons implémenté notre solution dans l'environnement de simulation NS-2. Les résultats de simulation obtenus montrent nettement l'amélioration apportée par rapport aux autres approches de l'état de l'art.

Nous nous sommes ensuite intéressés au cas où la mobilité est totale, autrement dit, tous les nœuds du réseau peuvent se déplacer. Dans ce cas, nous avons travaillé sur la problématique de la gestion de clés cryptographiques dans les RCSFs pour assurer la sécurité de la collecte de données. Dans ce cadre, nous avons proposé une solution de gestion de clés cryptographiques basée sur la distribution aléatoire de clés. Notre solution a la particularité d'assurer l'auto-guérison (*self-healing*) du réseau en cas de compromission de nœuds. Nous avons évalué et implémenté notre solution et nous l'avons comparée avec deux autres solutions de référence pour montrer son efficacité.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, gestion de la mobilité, conservation d'énergie.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) are increasingly invading our lives. With the rise of Internet of Things (IoT), WSNs are used in applications that require observation of the physical world and data collection. However, many obstacles inherent to the specificities of WSNs must be overcome before reaching the maturity of this technology. Among these obstacles, the resource limitations such as energy, computing capability, bandwidth and storage capability of sensor nodes. In this thesis, we focus on mobility management as a solution to improve network performance in terms of energy consumption and optimization of data collection.

A mobile wireless sensor network is a network in which at least the base station is mobile. We first looked at the case where only the base station is mobile. In this context, we proposed a network organization that leverages base station mobility to optimize

data collection while reducing the dissipated energy by sensor nodes. The proposed organization is based on a grid architecture and an optimized base station mobility algorithm for collecting data. We implemented our solution in the NS-2 simulation environment. The obtained simulation results show clearly the improvement brought by our proposal compared to other existing approaches.

Then, we looked at the case where the mobility is total, in other words, each sensor node in the network can be mobile. In this case, we worked on the issue of key management to ensure the security of data collection. In this context, we proposed a new key management scheme based on random key pre-distribution. Our solution has the particularity of ensuring the self-healing of the network when sensor nodes are compromised. We evaluated and implemented our solution and compared it with two other reference schemes to show its efficiency.

Keywords : Wireless sensor networks, mobility management, energy saving.

Table des matières

Table des matières	1
Liste des figures	3
Liste des tableaux	5
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	7
1.1 Introduction	8
1.2 Les capteurs : composants et caractéristiques	8
1.3 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	10
1.4 Caractéristiques d'un réseau de capteurs	11
1.5 Pile protocolaire	14
1.6 Classification des réseaux de capteurs sans fil	15
1.7 Domaines d'application	18
1.8 Propriétés et contraintes des RCSFs	20
1.9 Techniques d'optimisation de l'énergie	21
1.10 Conclusion	23
2 Les réseaux de capteurs sans fil mobiles	24
2.1 Introduction	25
2.2 Caractérisation générale de la mobilité dans les RCSFs	25
2.3 Mobilité de la station de base	26
2.3.1 Architecture d'un RCSF avec station de base mobile	28
2.3.2 Avantages de l'utilisation d'une station de base mobile	29
2.4 Contraintes et défis	31
2.5 Le mouvement de la station de base	34
2.5.1 Modèle de mobilité Aléatoire	34
2.5.2 Modèle de mobilité prévisible	35
2.5.3 Modèle de mobilité contrôlée	36
2.6 Conclusion	37

3	Collecte de données et mobilité dans les RCSFs	38
3.1	Introduction	39
3.2	Classification des approches de collecte de données avec une ou plusieurs stations de base mobiles	40
3.2.1	Approches qui visent à améliorer la durée de vie du réseau	40
3.2.2	Approches qui visent à améliorer le taux de livraison de données	46
3.2.3	Approches qui visent à minimiser la latence de la livraison de données	48
3.3	Étude comparative	51
3.4	Conclusion	53
4	Nouvelle approche de collecte de données basée sur la mobilité de la station de base dans les RCSFs	54
4.1	Introduction	55
4.2	EASY (Energy Aware Sink mobility)	56
4.2.1	Hypothèses	56
4.2.2	Construction de la grille	57
4.2.3	Sélection des CHs et organisation des cellules	60
4.2.4	Transmission des données	61
4.2.5	Mobilité de la station de base	61
4.3	Évaluation des performances	62
4.3.1	Modèle d'énergie	62
4.3.2	Résultats de simulation	64
4.3.2.1	Durée de vie du réseau	65
4.3.2.2	Taux de livraison de données	67
4.3.2.3	Passage à l'échelle	68
4.4	Conclusion	69
5	Mobilité et sécurité dans les RCSFs	71
5.1	Introduction	72
5.2	Solutions existantes	75
5.3	Solution proposée	76
5.3.1	Pré-distribution de clés	77
5.3.2	Établissement de clés avec les nœuds voisins	79
5.3.3	Établissement de clés avec les nœuds mobiles	79
5.3.4	Illustration par exemple	79
5.4	Évaluation	81
5.4.1	Métriques d'évaluation	81
5.4.2	Résultat	81
5.5	Conclusion	86
	Conclusion Générale et Perspectives	87
	Bibliographie	91

LISTE DES FIGURES

1.1	Les composants d'un nœud capteur.	10
1.2	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.	11
1.3	Topologie plate d'un RCSF.	13
1.4	Topologie hiérarchique d'un RCSF.	14
1.5	Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil.	14
1.6	Classification des RCSFs.	16
2.1	Classification de la mobilité dans les RCSFs.	25
2.2	Communication multi-sauts et le phénomène d'entonnoir (<i>hotspot</i>). . .	27
2.3	Architecture d'un RCSF avec station de base mobile.	28
2.4	Modèle de mobilité Aléatoire.	34
2.5	Modèle de mobilité prévisible.	35
3.1	Classification des approches de collecte de données avec une ou plusieurs stations de base mobiles.	40
3.2	Modèle d'arbre de dissémination de données dans SEAD [36].	43
3.3	PADD [39].	45
3.4	Exemple d'infrastructure virtuelle après la configuration initiale des itinéraires [44].	48
3.5	Structure à base de bande dans MESS [47].	50
4.1	Un RCSF décomposé en grille avec une station de base mobile.	55
4.2	La taille d'une cellule.	57
4.3	Grille 2×2 avec une cellule 50×50 mètres ² et une portée de communication de 70.71 mètres.	58
4.4	Grille 4×4 avec une cellule 25×25 mètres ² et une portée de communication de 35.35 mètres.	59
4.5	Grille 8×8 avec une cellule 12.5×12.5 mètres ² et une portée de communication de 17.6 mètres.	59
4.6	Description d'un tour (<i>round</i>).	60
4.8	La technique TDMA utilisée par les CHs.	61
4.7	Le choix de chef de cellule.	61
4.9	Modèle d'énergie [2, 39].	65
4.10	Durée de vie du réseau.	66
4.11	Énergie consommée.	67
4.12	Taux de données.	68

4.13	Efficacité en terme d'énergie.	69
5.1	La génération de clés.	78
5.2	Exemple d'établissement de clés avec les nœuds voisins.	80
5.3	Exemple d'établissement de clés avec les nœuds mobiles.	80
5.5	Resilience of E-RKP	82
5.4	Connectivité en terme de clés.	83
5.6	Auto-guérison de E-RKP	84
5.7	Énergie moyenne consommée.	85

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Comparaison des approches étudiées.	52
4.1	Paramètres de simulation.	65
5.1	Notation.	77
5.2	Paramètres de simulation.	85
5.3	Comparaison E-RKP, Rok et RKP.	86

INTRODUCTION GÉNÉRALE

LES progrès dans les domaines des communications sans fil, la micro-électronique et la fabrication des batteries miniatures pour le stockage de l'énergie électrique ont permis le développement de capteurs multi-fonctionnels avec des coûts réduits. Ceci a pavé le chemin pour que les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) soient aujourd'hui une technologie incontournable dans plusieurs domaines en particulier celui de la préservation de l'environnement : détection des feux de forêts, détection des fuites d'eau, mesure de la qualité de l'air, etc. La mise en œuvre d'un réseau de capteurs sans fil implique la collaboration de plusieurs disciplines, comme les systèmes embarqués, les réseaux informatiques, le traitement de signal et les systèmes distribués. A l'ère de l'Internet des objets, les RCSFs constituent la brique de base dans la mise en place des maisons intelligentes, des transports intelligents, des villes intelligentes,... etc.

La collecte de données est la principale fonction des RCSFs. Ces données sont alors traitées pour permettre des prises de décisions qui peuvent être importantes. Les nœuds capteurs sont des appareils autonomes miniaturisés. Un nœud capteur est composé d'une unité de traitement et de stockage de données, d'une unité de transmission sans fil et d'une batterie. Les nœuds capteurs sont généralement déployés dans le cadre de réseaux sans fil pour collecter et transmettre des données à une ou plusieurs stations de base. La station de base dispose d'une puissance de calcul élevée et d'une grande capacité de stockage pour traiter et mémoriser les données reçues. En plus, la station de base n'a pas de contrainte énergétique. L'utilisateur peut récupérer directement les données collectées de la station de base. Aussi, la station de base peut être reliée à un réseau ou à Internet afin d'acheminer les données collectées à un ou plusieurs utilisateurs.

Dans un RCSF, les nœuds capteurs ne peuvent pas tous communiquer directement avec la station de base. Ils doivent collaborer pour envoyer de proche en proche les données captées jusqu'à la station de base. Pour assurer cette communication multi-

sauts, beaucoup de protocoles au niveau de la couche réseau (routage des données) et la couche liaison (protocoles d'accès au médium (MAC)), ont été proposés dans le but d'optimiser les ressources des nœuds capteurs et étendre au maximum la durée de vie du réseau. Les premières propositions de protocoles de routage dans les RCSFs considèrent que tous les nœuds capteurs du réseau ont tous les mêmes rôles et sont dans le même niveau de hiérarchie. Bien que ces solutions sont simples et efficaces pour des réseaux de petite taille, elles ne traitent pas l'optimisation de ressources et ne s'adaptent pas aux réseaux à grande échelle.

Dans un réseau de capteurs statique, les nœuds capteurs proches de la station de base joueront le rôle de relais entre la station de base et les nœuds capteurs éloignés et sont plus sujets à l'épuisement prématuré de leurs batteries. Étant limité en ressource et jouant le rôle de relais, un nœud capteur peut se trouver dans un état où il ne peut fournir aucun service, y compris la détection, le traitement et la communication de données. Si cela se produit, le capteur est considéré comme un nœud mort et il sera retiré de la topologie du réseau. La durée de vie d'un capteur dépend fortement de la quantité d'énergie restante dans sa batterie. Lorsque des nœuds capteurs épuisent leurs batteries, la durée de vie de tout le réseau pourra être affectée, et cette situation peut causer une perte énorme de paquets de données dans le réseau en raison du changement de topologie engendré par les nœuds capteurs morts. Ces limitations en ressources font l'objet d'une recherche scientifique active sur les RCSFs afin d'assurer de bonnes performances de collecte et de stockage de données, de sécurité et une longue durée de vie du réseau.

Plusieurs travaux de recherche ont été proposés pour prolonger la durée de vie du réseau. Ces travaux principalement au niveau routage sont basés sur la technique de *clustering*. Le *clustering* ou le regroupement permet d'organiser les nœuds capteurs déployés sous forme de groupes où chaque groupe élit un nœud capteur comme chef de groupe responsable d'agréger et d'envoyer les données captées par les membres de groupe. Cette tâche de chef de groupe est actée par tous les nœuds capteurs d'un groupe à tour de rôle ou selon des critères (tel que le niveau d'énergie des nœuds capteurs) qui diffèrent d'une proposition à une autre. Une autre technique jumelée généralement avec la technique de *clustering* est l'utilisation des communications multi-sauts où le nœud capteur chef de groupe transmet ses données agrégées à un autre nœud capteur qui se charge à son tour d'envoyer les données captées afin d'atteindre la station de base.

Pour éviter que des nœuds capteurs proches de la station de base épuisent rapi-

dement leur batteries, la mobilité peut être utilisée comme une technique permettant l'amélioration des performances du réseau. Utiliser la mobilité pour assister la collecte de données assure la conservation de ressources, notamment l'énergie, mais représente un grand défi à soulever pour le bon fonctionnement des RCSFs. La gestion de la mobilité constitue l'une des thématiques de recherche les plus actives. L'utilisation de la mobilité peut constituer un choix pour améliorer les performances du réseau, comme elle peut constituer une partie intégrante exigée par l'application. Dans plusieurs applications des RCSFs telles que la surveillance des patients, d'animaux, de champs de bataille, etc., la mobilité est une nécessité. Selon l'entité mobile dans les RCSFs, nous distinguons deux classes de ces réseaux : RCSFs avec une ou plusieurs stations de base mobiles, ou des RCSFs avec des nœuds capteurs relais mobiles. Dans notre travail, nous nous intéressons dans un premier temps à la mobilité de la station de base vu que cette dernière a des ressources énergétiques illimitées. En effet, contrairement à un réseau de capteurs sans fil classique où les stations de bases restent stationnaires quelque part dans le réseau et reçoivent passivement des paquets de données provenant des nœuds capteurs. La station de base peut se déplacer vers les nœuds capteurs pour récupérer les données. Pour cela, la station de base recherche activement les emplacements optimaux qui assurent une minimisation d'énergie afin de maximiser la durée de vie du réseau. L'objectif principal de la première contribution de notre travail est de conserver l'énergie des nœuds capteurs en leur évitant d'envoyer leurs paquets de données sur de grandes distances. Par conséquent, nous obtiendrons une réduction de la perte de données et une extension de la durée de vie du réseau de capteurs sans fil. En outre, le déplacement de la station de base assure un équilibrage de charge énergétique entre tous les nœuds capteurs du réseau.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressées au cas où tous les nœuds capteurs sont mobiles. Dans ce cas, on se retrouve avec un réseau dynamique difficilement prévisible. Cependant, cette mobilité peut être un atout pour le fonctionnement du réseau, en particulier dans l'amélioration de la sécurité des communications entre nœuds capteurs. La sécurité de communications est une nécessité pour la majorité des applications qui utilisent les RCSFs, notamment si les nœuds capteurs sont déployés dans des endroits peu sûrs. Ces nœuds capteurs, qui communiquent par une liaison radio, peuvent être soumis à des actions perturbatrices et malveillantes susceptibles de perturber, voir même stopper, la mission d'un RCSF. C'est pourquoi, il est primordial de pouvoir leur assurer un niveau de sécurité acceptable.

L'agrégation et l'acheminement des données captées ne peuvent se faire correctement si les messages sont échangés en clair et en présence d'un adversaire qui veut

attaquer le réseau. Ce dernier peut affecter l'opération de collecte de données comme par exemple l'envoi de messages erronés qui mène à induire en erreur l'utilisateur final ou de perturber la création de la topologie du réseau comme par exemple perturber les échanges de messages pour élire un chef de groupe dans un ensemble de nœuds capteurs. Pour faire face aux menaces d'un attaquant, c'est en générale un mécanisme de cryptographie qui est appliqué pour cacher le contenu des messages échangés dans le réseau.

Pour les périphériques à ressources limitées tels que des nœuds capteurs, appliquer un lourd mécanisme de cryptographie asymétrique gourmand en ressources tel que RSA n'est pas réalisable. Cependant, un système cryptographique symétrique qui utilise peu de ressources peut être appliqué. La robustesse d'un système cryptographique symétrique repose sur la réussite de la solution de gestion des clés. Cependant, la plupart des solutions de gestion de clés proposées se concentrent sur les RCSFs statiques et n'envisagent pas l'ajout de nouveaux capteurs et leurs mobilités d'une part et ils ne fournissent pas de résilience suffisante à l'attaque de compromission de nœuds d'autre part. En effet, les nœuds capteurs déployés sont susceptible d'être capturés par un attaquant qui peut accéder à la mémoire du nœud capteur afin de découvrir le matériel cryptographique stocké. En réalité, les ajouts de nœuds conviennent aux applications conçues pour une longue période d'existence. Cependant, ces applications sont très sensibles aux attaques notamment la compromission de nœuds.

Organisation de la thèse

Cette thèse est organisée comme suit :

Dans le premier chapitre, Nous définissons les réseaux de capteurs sans fil, leurs domaines d'applications, leur architecture et les contraintes liées à ce type de réseau. Nous présentons une classification des RCSFs selon le mode d'acquisition et de livraison des données à la station de base, le type de communication utilisé, le modèle de mobilité dans le réseau et selon les capacités des nœuds du réseau. Nous présentons également les techniques d'optimisation d'énergie dans les RCSFs. Ensuite, dans le deuxième chapitre nous abordons l'aspect mobilité avec ses avantages et ses types. Nous avons commencé par faire une étude de l'existant pour bien comprendre l'architecture actuelle de la collecte de données dans les réseaux de capteurs et de recenser les besoins en terme de conservation de ressources notamment l'énergie. Dans cet état de l'art, nous nous sommes intéressés à l'agrégation de données et aux types de mobilité de la station de base. Le troisième chapitre est consacré à l'introduction des solutions de collecte de

données avec une ou plusieurs stations de base mobiles. Nous proposons une classification des approches de collecte de données basées sur la mobilité de la ou les stations de bases. Nous discutons également les avantages et les inconvénients de chaque approche.

Dans le quatrième chapitre, nous détaillons notre première contribution qui consiste en une nouvelle approche de collecte de données dans les RCSFs avec une station de base mobile. Dans notre solution, la surface du réseau est divisée en grille de cellules avant le déploiement des nœuds ce qui évite un échange de messages après le déploiement pour la construction de la grille. Nous avons également proposé un algorithme de gestion de la mobilité de la station de base. Dans notre approche, les positions de la station de base dépendent de l'énergie des nœuds capteurs et de la distance entre la station de base et les nœuds capteurs en charge d'envoyer les données dans chaque cellule. L'objectif de notre approche consiste à adapter de manière optimale la position de la station de base dans le but de préserver l'énergie des nœuds. Nous avons évalué notre proposition et nous l'avons comparé avec d'autres approches de la littérature.

Dans le cinquième chapitre, nous nous intéressons au cas où tous les nœuds du réseau sont mobiles. Dans ce cas, nous nous intéressons à la sécurité du réseau. Nous proposons une nouvelle méthode de pré-distribution de clés basée sur distribution aléatoire de clés appelée E-RKP (Enhanced Random Key Pre-distribution). La solution proposée assure une auto-guérison (*self-healing*) du réseau lorsque des nœuds sont compromis. Cela signifie que l'effet des nœuds compromis disparaît avec le temps, tout en prenant en charge la mobilité des nœuds et/ou la station de base. L'évaluation de notre solution montre son efficacité.

Dans la conclusion de la thèse, nous dressons le bilan des travaux réalisés et donnons quelques perspectives principalement liées aux nouvelles techniques de l'utilisation des RCSFs comme la collecte de données massives et l'IoT (*Internet of things*).

Ce travail a donné lieu aux publications suivantes :

— Revue internationale avec comité de lecture

1. Sarra Messai, Zibouda Aliouat, Hamida Seba & Abdallah Boukerram (2018). « Adaptive sink mobility for energy-efficient data collection in grid-based wireless sensor networks ». International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing. doi : 10.1504/IJAHUC.2018.10015649. HAL : hal-01872350.

— Conférences internationales avec comité de lecture et actes

1. Sarra Messai, Mohamed-Lamine Messai, Hamida Seba & Zibouda Aliouat. «

- A Full-Healing Key Distribution Scheme for Resource-Constrained Devices
». 2019 6th International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM), 18 décembre 2019, Paris (France). HAL : hal-02413663.
2. Besem Abid, Sarra Messai & Hamida Seba (2018). « Energy-based connected dominating set for data aggregation for intelligent wireless sensor networks ». International Conference on Machine Learning for Networking, 27 novembre 2018, Paris (France). HAL : hal-01886633.
 3. Sarra Messai, Abdellah Boukerram & Hamida Seba (2016). « Energy-Efficient Data Collection in Grid-Based Wireless Sensor Networks Using a Mobile Sink ». 2016 9th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 13 juillet 2016, Colmar (France). HAL : hal-01353926.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

Cités dans la revue *Technology Review* éditée par le MIT dans l'article *10 Emerging Technologies That Will Change the World* en 2003, les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont une technologie prometteuse et favorisent la réalisation de plusieurs applications. Un RCSF est constitué d'un ensemble de nœuds capteurs disséminés généralement d'une manière aléatoire dans une zone d'intérêt. Les nœuds capteurs sont des dispositifs capables de collecter des informations (telles que la température, l'humidité, particules fines, ..., etc) dans leur rayon de perception et de communiquer sans fil avec d'autres nœuds capteurs. La consommation d'énergie est l'un des aspects les plus importants, étant donné que les nœuds capteurs sont, dans la plupart des applications, équipés des batteries non-rechargeables et également inaccessibles. Dans ce premier chapitre, nous présentons dans un premier temps l'architecture, la pile protocolaire des RCSFs ainsi que la composition d'un nœud capteur dans le but est d'expliquer leur fonctionnement. Ensuite, nous donnons les domaines d'application des RCSFs avec leurs propriétés et contraintes. Nous présentons en dernier lieu les techniques d'optimisation d'énergie dans les RCSFs.

1.1 Introduction

Les progrès dans les domaines des communications sans fil, la micro-électronique et la fabrication de batteries miniatures pour le stockage de l'énergie électrique ont permis le développement de capteurs multi-fonctionnels avec des coûts réduits. Ces derniers, appelés nœud capteurs, intègrent : une unité de captage chargée de capter des grandeurs physiques (chaleur, humidité, vibrations) et de les transformer en grandeurs numériques, une unité de traitement informatique et de stockage de données et un module de transmission sans fil. Un grand nombre de ces dispositifs sont déployés dans la nature afin de créer un réseau de capteurs à des fins aussi bien de contrôle que de surveillance. Un nœud capteur est muni d'une ressource énergétique (une batterie) pour alimenter tous ses composants. Cependant, en raison de sa taille réduite, la ressource énergétique dont il dispose est limitée et généralement irremplaçable. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des nœuds capteurs, voire du réseau en entier.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont considérés comme un type particulier de réseaux ad hoc, c'est-à-dire qu'ils ne nécessitent pas d'infrastructure préalable et peuvent être déployés dans un champ d'intérêt, depuis un hélicoptère par exemple, dans des zones hostiles, tel qu'un champ militaire, ou afin de surveiller des phénomènes naturels tel qu'un volcan. Les nœuds capteurs peuvent recueillir et transmettre des données environnementales de manière autonome. Ce chapitre introductif présente les caractéristiques et l'architecture d'un nœud capteur et d'un RCSF, les domaines d'application des RCSFs ainsi que les contraintes et les défis qu'ils devraient relever. Nous présentons également les techniques utilisées dans un RCSF afin d'optimiser l'énergie.

1.2 Les capteurs : composants et caractéristiques

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique, peu coûteux, doté de ressources limitées en énergie (batterie), en puissance de calcul et en capacité de stockage. Un capteur possède la capacité de mesurer une valeur physique environnementale telle que la température, la lumière, la pression, etc. et de la transmettre en utilisant les communications sans fil à un centre de contrôle appelé une station de base. Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans toute application dont l'objectif est de surveiller l'environnement.

Un capteur est composé essentiellement de quatre unités de base représentées dans la Figure 1.1

- **L'unité d'acquisition** : composée généralement de deux sous-unités qui sont les capteurs et les convertisseurs analogiques-numériques ADCs (*Analog-Digital Converter*). Les capteurs recueillent les grandeurs physiques et fournissent des signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.
- **L'unité de traitement** : composée de deux interfaces, une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Cette unité contrôle la collaboration d'un nœud avec les autres nœuds afin de collecter et de stocker les données.
- **Un module de communication (Transceiver)** : Composé d'un émetteur et d'un récepteur permettant la communication entre les différents nœuds du réseau via un support de communication radio.
- **Batterie** : sert à alimenter les unités citées ci-dessus, généralement elle n'est ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de la conception de protocoles de routage pour les réseaux de capteurs.

Il existe des capteurs qui comportent des unités supplémentaires : générateur d'alimentation, unité mobile pour déplacer le capteur et un système de localisation.

- **Le système de localisation de nœud** : Dans plusieurs applications, il est nécessaire qu'un nœud capteur soit capable de déterminer sa position géographique. Dans ce cas le capteur doit être équipé d'un système de localisation géographique GPS (*Global Positioning System*) ou bien d'un module software qui implémente des algorithmes de localisation qui fournissent des informations sur la position du nœud par des calculs distribués.
- **L'unité mobile** : Un nœud capteur peut être doté d'un système de mobilité chargé de le déplacer pour accomplir ses tâches. Le support de mobilité exige des ressources énergétiques étendues qui devraient être fournies efficacement. L'unité mobile peut, également, opérer en étroite collaboration avec l'unité de détection et le processeur pour contrôler les mouvements du nœud.
- **Le régénérateur de l'énergie** : Dans la plupart du temps les nœuds capteurs sont alimentés par une batterie, un générateur électrique supplémentaire est indispensable pour des applications où une longue durée de vie de réseau est exigée. Pour des applications extérieures, des piles solaires sont utilisées pour générer l'alimentation électrique. De même, des techniques de récupération d'énergie thermique ou cinétique peuvent également être utilisées.

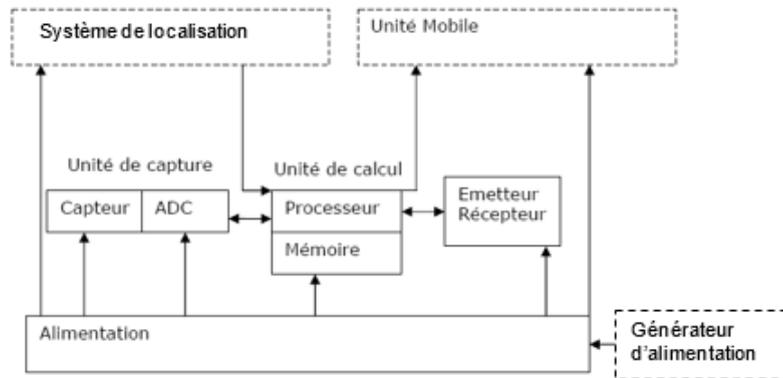


FIGURE 1.1 – Les composants d'un nœud capteur.

Les capteurs sont restreints en ressources. Ils sont généralement caractérisés par :

- **Énergie limitée** : Chaque nœud capteur est alimenté avec une batterie, généralement, non rechargeable avec une capacité énergétique très limitée. Dans la plupart des cas, ces nœuds capteurs sont déployés dans des zones hostiles ou à accès difficiles, c'est-à-dire, il est très peu probable voire impossible dans certains cas qu'ils soient récupérables. De plus, les nœuds capteurs sont déployés en très grand nombre (des milliers). Par conséquent, tout programme dédié à fonctionner sur un nœud capteur doit prendre en considération la gestion d'énergie. Surtout en temps de transmission du fait qu'une communication sans fil est l'opération la plus consommatrice d'énergie.
- **Faible puissance de stockage et de traitement** : La puissance de calcul et la capacité de stockage et de traitement sont très limitées dans un nœud capteur. Prenons comme exemple les nœuds capteurs de type *mote* : composés d'un micro-contrôleur 8 bits 4 MHz, 40 Ko de mémoire et d'une radio d'un débit d'environ 10 kbps. Un autre exemple plus récent de nœuds capteurs sont les *Zolertia mote (Z1)* équipés d'un micro-contrôleur de 16 bits 16 Mhz et 16 Miga byte de mémoire.
- **Petite portée de transmission** : La portée de transmission est limitée par la puissance du signal et par la capacité de rayonnement des antennes utilisées. Pour qu'un nœud capteur dispose d'une portée de communication assez grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. La communication entre deux nœuds capteurs dépend de la distance qui les sépare, plus cette distance est grande, plus la communication devient coûteuse en consommation énergétique.

1.3 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteur sans fil (RCSF) présenté dans la Figure 1.2, est généralement constitué d'un ensemble de nœuds capteurs, variant de quelques dizaines à plusieurs milliers, déployés dans une zone géographique ou un environnement d'intérêt, communiquant entre eux par ondes radio afin d'acheminer les données captées vers un nœud collecteur appelé station de base (*sink*). La station de base, qui peut être un ordinateur, reçoit les données des capteurs et les transmet à l'utilisateur final par d'autres réseaux tels que Internet ou par satellite pour analyser ces données et prendre des décisions. Dans le cas le plus simple, les nœuds capteurs seront dans le voisinage direct de la station de base (communication à un saut). Cependant, dans le cas d'un réseau à grande échelle, ils ne sont pas tous dans le voisinage de la station de base et les données seront acheminées d'un nœud source vers la station de base en transitant par plusieurs nœuds, selon un mode de communication multi-sauts.

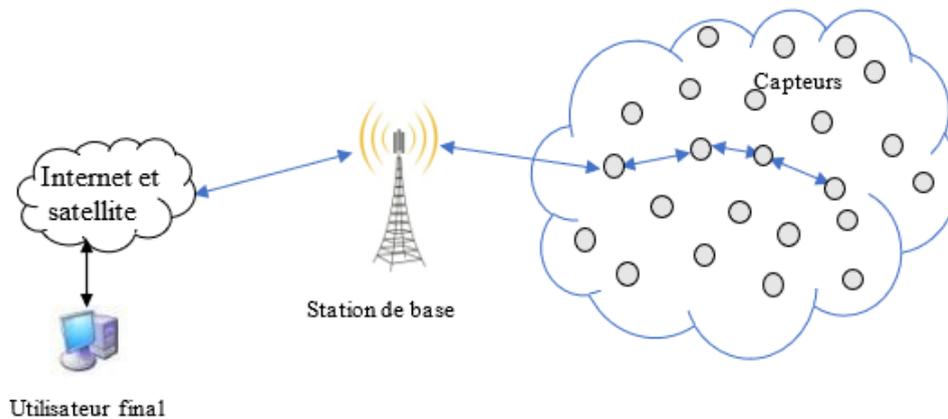


FIGURE 1.2 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.

En fonction de la taille et de la topologie du réseau, il pourrait y avoir une ou plusieurs stations de bases qui peuvent être fixes dans des positions ou mobiles dans la zone du réseau [1, 2]. La station de base est habituellement supposée avoir une grande capacité de calcul et elle n'a pas de contraintes en termes d'énergie et de stockage. La tâche d'un nœud capteur comprend la création des paquets de données captées et la transmission sans fil de ces données à la station de base ou à d'autres nœuds capteurs. Lorsque le nœud capteur consomme toute son énergie (sa batterie est épuisée), il ne peut fournir aucun service, y compris la détection, le traitement des données ou la communication de données. Si cela se produit, le nœud capteur est considéré comme

un nœud mort et il sera retiré de la topologie du réseau.

1.4 Caractéristiques d'un réseau de capteurs

En plus des caractéristiques liées aux nœuds capteurs, il existe d'autres caractéristiques relatives au réseau telles que la bande passante, la densité, le type de communication inter-nœuds, le déploiement, et la topologie du réseau.

- Bande passante

La bande passante utilisée dans les réseaux de capteurs sans fil est généralement très réduite. Ainsi, les échanges des messages protocolaires destinés au bon fonctionnement des protocoles de communication (*overhead*) sont limités au maximum.

- Densité

Certaines applications des réseaux de capteurs sans fil exigent une forte densité des nœuds capteurs ce qui permet d'avoir des résultats de mesure fiables, d'exclure l'isolement des nœuds et de favoriser l'utilisation des communications multi-sauts qui consomment moins d'énergie que les communications traditionnelles à un seul saut. Néanmoins, elle engendre des problèmes de communication non négligeables notamment la congestion.

- Types de communication inter-nœuds

Différents types de communication sont utilisée dans les RCSFs, nous citons :

- **Unicast** : utilisé pour échanger des informations entre deux nœuds capteurs dans un réseau.
- **Broadcast** : la station de base diffuse des informations vers tous les nœuds du réseau. Ces informations peuvent être des requêtes de données, des mises à jour de programmes ou des paquets de contrôle.

- **Local Gossip** : utilisé par des nœuds déployés dans une région bien déterminée qui collaborent ensemble afin d’avoir une meilleure estimation de l’évènement observé et d’éviter l’émission du même message vers la station de base.
- **Multicast** : il permet une communication entre un nœud et un groupe de nœuds.

- Déploiement

Les réseaux de capteurs sans fil aux quelles nous nous intéressons sont souvent caractérisés par un déploiement dense et à grande échelle. Nous distinguons deux méthodes pour le déploiement des nœuds capteurs :

- **Méthode aléatoire** : les nœuds sont dispersés (largués par des avions par exemple) sur la zone de captage en raison de l’inaccessibilité de la zone.
- **Méthode déterministe** : les nœuds sont placés de manière individuelle à des endroits bien précis dans la zone de captage. Cependant, un plan général pour le déploiement initial doit être conçu pour permettre de réduire les coûts d’installation, de faciliter l’auto-organisation des nœuds et leur tolérance aux pannes.

- Topologies d’un réseau de capteurs sans fil

La topologie du réseau permet de déterminer l’organisation des capteurs. Les architectures des réseaux de capteurs se présentent sous forme de deux topologies [3].

- **Topologie plate** : Un réseau de capteurs sans fil plat, comme illustré dans la Figure 1.3, est un réseau homogène, où tous les nœuds ont les mêmes fonctionnalités et possèdent les mêmes ressources. La station de base joue le rôle d’une passerelle, elle assure la transmission des informations collectées par les capteurs à l’utilisateur final. Selon le service et le type de capteurs, une densité de capteurs élevée (plusieurs nœuds capteurs/ m^2) ainsi qu’une communication multi-sauts peuvent être nécessaire pour l’architecture plate. Ce type de solution permet une grande tolérance aux pannes, cependant, elle ne permet pas le passage à l’échelle. En effet, si tous les nœuds opèrent de la même façon et d’une manière distribuée, un grand nombre de messages de contrôle sera nécessaire pour le bon fonctionnement du réseau.

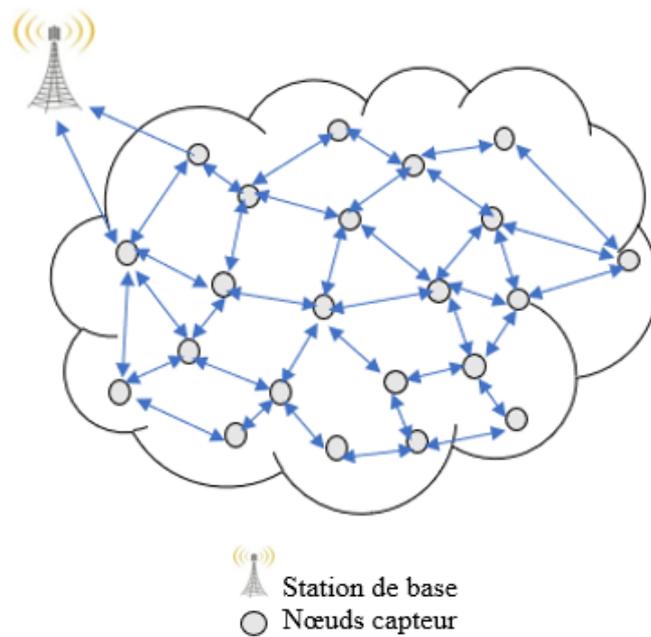


FIGURE 1.3 – Topologie plate d'un RCSF.

- **Topologie hiérarchique** : Dans une topologie hiérarchique, comme illustrée dans la Figure 1.4, les nœuds capteurs sont divisés en plusieurs niveaux de responsabilité. Le *clustering* est l'une des méthodes employées dans la topologie hiérarchique, où les nœuds capteurs sont organisés en groupes appelés *clusters*. Un cluster est constitué d'un chef (*Cluster-Head (CH)*) et des nœuds membres. Les nœuds membres collectent et envoient leurs données aux Cluster-Heads, qui servent de relais entre les nœuds du cluster et la station de base directement ou via d'autres Cluster-Heads. La topologie hiérarchique présente beaucoup d'avantages tels que l'agrégation des données collectées ainsi qu'une grande capacité de passage à l'échelle. Son inconvénient majeur est la surcharge des Cluster-Heads qui induit un déséquilibre de la consommation d'énergie dans le réseau. Pour remédier à ce problème, les Cluster-Heads peuvent être des capteurs spécifiques avec plus de ressources énergétiques et plus de capacité en traitement et en stockage ou bien ils peuvent être élus dynamiquement et ainsi garantir un équilibre de la consommation d'énergie et augmenter la tolérance aux pannes.

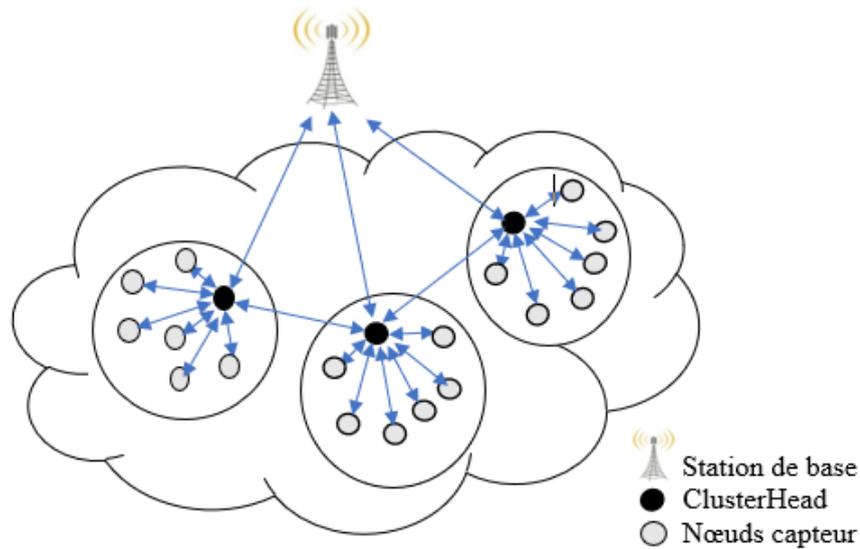


FIGURE 1.4 – Topologie hiérarchique d'un RCSF.

1.5 Pile protocolaire

Dans le but d'améliorer la robustesse du réseau de capteurs sans fil et assurer certaines fonctionnalités, une architecture en couches est adoptée. La pile protocolaire [1] utilisée par la station de base ainsi que par tous les autres noeuds capteurs du réseau est illustrée par la Figure 1.5. Ce modèle comprend 5 couches (une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données, une couche physique) qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI, ainsi que 3 niveaux (plans) qui sont : un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches.

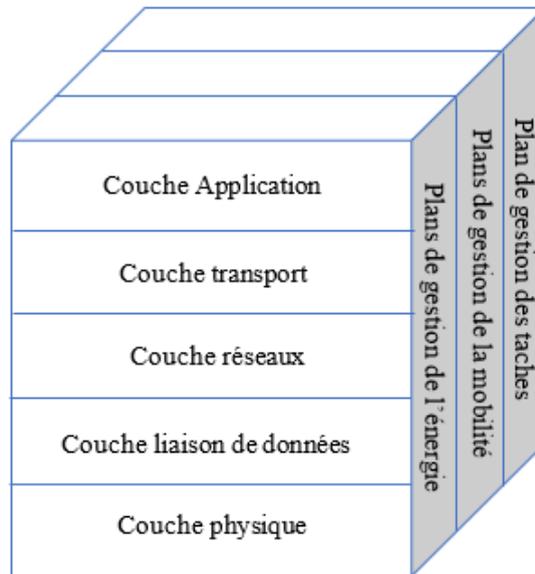


FIGURE 1.5 – Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil.

- **La couche physique** : La couche physique est responsable de la bonne émission et réception de données, de la sélection des fréquences et de la détection du signal.
- **La couche liaison de données** : Cette couche est responsable du multiplexage du flux de données, de la détection et du verrouillage des trames de données et du contrôle des erreurs. Elle assure une connexion fiable (point à point ou point-à-multipoints) selon la topologie du réseau de capteurs. La sous-couche MAC (*Media Access Control*) de la couche liaison de données gère le contrôle d'accès au média, elle détermine, pour un nœud, la possibilité et le moment pour accéder au canal de communication.
- **La couche réseau** : La couche réseau s'occupe de l'acheminement des données (trouver une route et une transmission fiable des données) captées, des nœuds capteurs vers la station de base en optimisant l'utilisation de l'énergie des capteurs.
- **La couche transport** : Cette couche est chargée du transport des données sans ré-ordonnancement ou duplication, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.
- **La couche application** : C'est le niveau le plus proche de l'utilisateur, elle assure l'interface avec les applications. Selon les tâches de détection, différents types d'applications peuvent être implémentés et utilisés sur la couche application.

Quant aux niveaux (plans) intégrés dans la pile protocolaire dans les RCSFs, ils

assurent les fonctions suivantes :

1. **Le plan de gestion d'énergie** : La vie du nœud montre une dépendance forte à l'égard de la vie de la batterie. Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs. Un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception radio dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués.
2. **Le plan de gestion de mobilité** : Selon le type d'application, les nœuds capteurs peuvent être mobiles. Ce plan est responsable d'enregistrer les mouvements d'un nœud et de connaître sa localisation.
3. **Plan de gestion de tâches** : Le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, ce qui permet de prolonger la durée de vie du réseau.

1.6 Classification des réseaux de capteurs sans fil

Il existe plusieurs critères pour classifier les réseaux de capteurs [4, 5, 6]. En effet, nous pouvons classifier les RCSFs selon le mode d'acquisition et de livraison des données à la station de base, le type de communication utilisé, le modèle de mobilité dans le réseau ou selon les capacités des nœuds du réseau. Nous présentons dans la Figure 1.6 la classification des RCSFs puis nous expliquons le principe de fonctionnement de chaque classe.

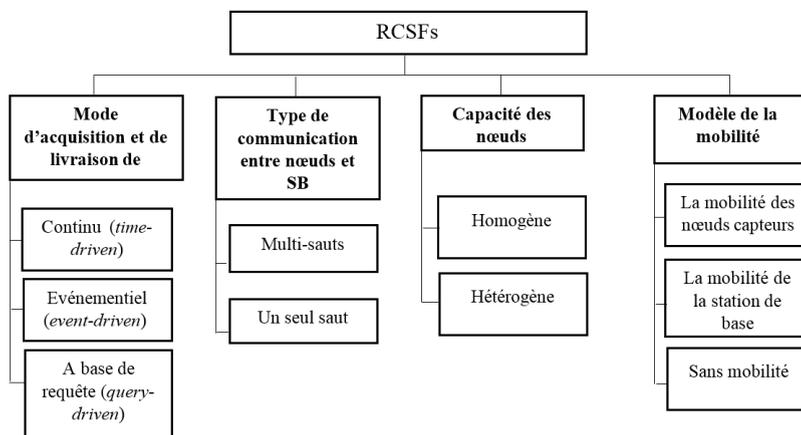


FIGURE 1.6 – Classification des RCSFs.

1) Selon le mode d'acquisition et de livraison des données à la station de base

Dans les réseaux de capteurs, le modèle d'acquisition et de livraison des données à la station de base dépend de l'application et de ses exigences. Il peut être :

- *Continu (time-driven)* : Les nœuds doivent périodiquement (intervalle de temps constant) réveiller leurs émetteurs pour envoyer les données captées à la station de base. Ce type de modèle est recommandé dans les applications de surveillance où le but principal est d'avoir des informations régulières de la zone surveillée.
- *Événementiel (event-driven)* : les capteurs envoient leurs mesures seulement quand il y a un événement qui se produit. Ce type de modèle est recommandé pour les applications de surveillance d'événements critiques où le but principal est l'obtention d'une information sur l'événement le plus rapidement possible.
- *A base de requête (query-driven)* : dans le modèle orienté requêtes, les capteurs mesurent des phénomènes et stockent ces mesures dans leurs mémoires. Ils envoient ces mesures seulement quand ils reçoivent des requêtes de la station de base.
- *Hybride* : c'est une combinaison des trois modèles précédents.

2) Selon la distance entre les nœuds capteurs et la station de base

Dans cette classe de RCSFs, nous distinguons les réseaux multi-sauts (*multi-hop WSNs*) et les réseaux à un seul saut (*Single-hop WSNs*). Dans un réseau de capteurs à un simple saut, les nœuds capteurs sont dans le voisinage immédiat de la station de base. Ils envoient alors leurs données captées directement à la station de base sans passer par aucun autre nœud intermédiaire.

Dans le réseau de capteurs multi-sauts, la distance entre quelques nœuds capteurs et la station de base dépasse leur portée maximale. Pour envoyer leurs données à la station de base, ils doivent le faire par l'intermédiaire d'autres nœuds. Ce type de réseau a une large gamme d'application mais il est difficile à mettre en œuvre [5].

3) Selon les capacités des nœuds du réseau

Dans cette classe, nous distinguons deux sous-classes selon le type de nœuds : homogènes ou hétérogènes [5, 7]. Dans un réseau de capteurs homogène, tous les nœuds du réseau ont les mêmes capacités du point de vue d'énergie, capacité de calcul et capacité de stockage. Alors que, dans un réseau de capteurs hétérogène il y a quelques nœuds sophistiqués qui ont plus de capacité de traitement et de communication que les nœuds normaux. Cela améliore l'efficacité énergétique et prolonge la durée de vie du réseau. L'avantage d'un tel réseau est que ces nœuds sophistiqués peuvent être utilisés pour exécuter des tâches plus complexes et agir comme des coordinateurs, des chefs de *clusters* (*cluster-heads*), etc. Son inconvénient est qu'il est difficile de positionner ces nœuds quand le déploiement est aléatoire. En outre, le coût de ces nœuds est élevé.

4) Selon le modèle de mobilité dans le réseau

Dans cette classe, nous regardons la mobilité des nœuds capteurs et celle de la station de base. Nous pouvons distinguer deux grandes catégories de réseaux : réseaux statiques et réseaux dynamiques ou mobiles (*static and mobile networks*). On peut par exemple avoir un réseau constitué d'un ensemble de nœuds capteurs mobiles et d'une station de base fixe. Ce type de réseau permet l'exploration de zones inaccessibles ou dangereuses. On peut également avoir un réseau constitué de capteurs fixes et d'une station de base mobile. Le but est de minimiser la consommation d'énergie et éviter ainsi la déconnexion du réseau et la perte de données.

1.7 Domaines d'application

Les réseaux de capteurs sans fil sont généralement utilisés pour contrôler certaines activités et surveiller des événements dans un domaine ou dans un environnement spécifique. Les réseaux de capteurs sans fil ont trouvé leur place dans une grande variété d'applications et systèmes, avec des besoins et des caractéristiques nettement différents [8]. Des exemples d'applications potentielles dans différents domaines sont exposés ci-dessous :

- Applications militaires

Grace à leur déploiement rapide, leur auto-configuration et leur tolérance aux pannes, les réseaux de capteurs sans fil dans un tel domaine nous permettent d'acquérir et de vérifier des informations sur la position et la capacité de l'ennemi, d'assurer la surveillance des champs de bataille et d'analyser le terrain avant d'envoyer des troupes. Les missions de surveillance comportent souvent un risque élevé pour le personnel humain. De ce fait, la capacité de déployer des missions de surveillance sans pilote, en utilisant des réseaux de capteurs sans fil, revêt une grande importance pratique pour les militaires.

- Applications médicales et aide à la personne

L'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans les applications médicales a suscité une attention particulière de la part des chercheurs. Il existe des micro-capteurs qui pourraient être avalés (sous forme de gélule) ou implantés sous la peau. Ces capteurs peuvent aider les médecins à recueillir des mesures sur certains paramètres physiologiques et à faire le suivi en temps réel des fonctions vitales de l'être humain. D'autres applications biomédicales ambitieuses basées sur les RCSFs existent également aujourd'hui, citons la surveillance de la glycémie, la surveillance à distance des soins pour lesquels la présence constante d'un professionnel de la santé n'est pas nécessaire, telle que la surveillance de la réadaptation, la surveillance des personnes âgées ou pour apporter une aide à une personne handicapée physiquement. Dans l'avenir, il sera possible de surveiller les patients en permanence et de donner les médicaments nécessaires qu'ils soient à la maison, dans un hôpital ou ailleurs. Les patients n'auront plus besoin d'être connectés à de grandes machines afin d'être surveillés.

- Applications environnementales

Il existe de nombreuses applications dans la surveillance de paramètres environnementaux tels que la surveillance de la pollution de l'air, la détection des incendies de forêt, la détection des glissements de terrain, la surveillance de la qualité de l'eau et la prévention des catastrophes naturelles. Des capteurs peuvent être déployés en forêt ou dans un environnement de conservation de la faune et de la flore afin de suivre et

enregistrer les mouvements d'animaux et d'oiseaux...etc.

- Applications industrielles

Des capteurs peuvent être déployés sur les centrales nucléaires ou dans les sites pétroliers pour détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques,...) et alerter les utilisateurs dans un délai suffisamment court pour permettre une intervention efficace.

- Applications domotiques

Les capteurs peuvent être embarqués dans des dispositifs domestique tels que : les aspirateurs, les fours, les réfrigérateurs, les micro-ondes, etc. Ces capteurs permettent à l'utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance.

- Applications commerciales

Dans le domaine de la grande distribution, les réseaux de capteurs pourraient améliorer le processus de stockage et de livraison. Les capteurs peuvent être déployés, pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet. Des entreprises manufacturières, à l'aide des réseaux de capteurs, pourraient suivre le procédé de production depuis la matière première jusqu'au produit final livré.

1.8 Propriétés et contraintes des RCSFs

La conception et l'implémentation des réseaux de capteurs sans fil sont guidées par plusieurs propriétés considérées comme des métriques de comparaison de performances entre les différents travaux dans le domaine.

- **Durée de vie du réseau** : Les ressources limitées telles que l'énergie des nœuds capteurs posent différents problèmes dans la conception d'un réseau de capteurs sans fil, en particulier, comment maintenir un niveau opérationnel du réseau le

plus longtemps possible. Le but principal des applications des RCSFs consiste à déployer des nœuds capteurs dans un domaine sans surveillance pendant des mois ou des années. Cependant, la durée de vie du réseau est une métrique d'évaluation de performance très importante dans les réseaux de capteurs sans fil. Il existe différentes définitions pour la durée de vie d'un réseau de capteurs, chaque définition s'appuie sur la fonctionnalité désirée. La vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle le réseau peut, selon le cas : maintenir assez de connectivité, couvrir le domaine entier, ou garder le taux de perte de paquets en-dessous d'un certain niveau. Elle peut être définie par :

- La durée jusqu'au moment où le premier nœud épuise toute son énergie [7, 9, 10].
- La durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leurs énergies [12].
- **Passage à l'échelle** : Le passage à l'échelle est une contrainte liée étroitement à la nature de l'application des réseaux de capteurs sans fil. Selon l'application, le nombre de nœuds déployés pour une zone d'intérêt peut atteindre plusieurs centaines voire des milliers de nœuds. Cependant, les solutions proposées doivent assurer l'efficacité et le bon fonctionnement des réseaux fortement denses.
- **Topologie dynamique** : Dans certaines applications, le réseau de capteurs sans fil doit supporter des topologies denses et dynamiques. La topologie d'un réseau de capteurs devient dynamique lorsqu'un nouveau nœud rejoint le réseau ou quitte le réseau à cause d'une défaillance. La topologie peut également changer dans le cas où les capteurs sont mobiles.
- **Tolérance aux pannes** : Les nœuds capteurs peuvent être sujets à des défaillances ou des dysfonctionnements engendrés par plusieurs causes, notamment l'épuisement de l'énergie du nœud, l'endommagement physique ou les interactions externes (chocs, interférences liées à l'environnement, pertes de nœuds). La panne d'un nœud capteur ne doit pas affecter le fonctionnement global de son réseau. La tolérance aux pannes est donc la capacité de maintenir un bon fonctionnement du réseau après une défaillance d'un ou de plusieurs nœuds capteurs.
- **Ressources limitées** : Les ressources des nœuds capteurs sont très limitées en ce qui concerne la puissance de calcul et la capacité de stockage, en plus de la ressource d'énergie électrique présentée ci-dessus. Certes l'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance significative mais si le nœud capteur effectue des traitements qui nécessitent un calcul complexe cela peut avoir un impact direct sur la durée de vie du réseau. Réduire la consommation de ressources tout en fournissant une qualité de service acceptable permet

de prolonger la durée de vie du réseau.

1.9 Techniques d'optimisation de l'énergie

La communication, c'est-à-dire, l'émission et la réception des messages est la phase la plus consommatrice de l'énergie dans un nœud capteur. A cet effet, plusieurs approches ont été proposées pour conserver la ressource énergétique au niveau des capteurs et pouvoir surmonter les défis liés à sa limitation. La durée de vie est sans doute la métrique la plus importante dans l'évaluation des performances d'un réseau de capteurs. En effet, dans un environnement contraint, toute ressource limitée doit être prise en compte. Toutefois, la durée de vie du réseau, comme mesure de la consommation d'énergie, occupe une place exceptionnelle puisqu'elle constitue la borne supérieure de l'utilité de ce réseau [13, 14]. Maximiser la durée de vie du réseau revient à réduire la consommation énergétique des nœuds. Malgré les progrès qui ont été faits, la durée de vie de ces dispositifs à batteries continue d'être un défi majeur et un facteur clé dans la conception d'un réseau de capteurs sans fil. Ils existent différentes techniques qui permettent de minimiser la consommation d'énergie des nœuds capteurs, nous citons quelques unes ci-après.

- Technique du *Duty-cycling*

Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille (*low-power*) à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. En principe, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et/ou à recevoir, en revanche, elle doit être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu. Ainsi, les nœuds alternent entre la période active et la période de sommeil en fonction de l'activité du réseau. Ce comportement est généralement dénommé *Duty-cycling*. Un *Duty-cycle* est défini comme étant la fraction de temps où les nœuds sont actifs. Étant donné que les nœuds capteurs effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs temps de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnancement Sommeil/Réveil accompagne donc tout plan de *Duty-cycling*. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué reposant sur les dates auxquelles des nœuds décident de passer d'un état à un autre. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui rend possible l'échange de paquets, même si les nœuds

ont un faible *Duty-cycle* (c.à.d., ils dorment la plupart du temps). Parmi les protocoles basés sur la technique du *Duty-cycling*, les protocoles MAC fondés sur la méthode TDMA [2, 15, 16, 17] où le temps est divisé en trames (périodiques) et chaque trame se compose d'un certain nombre de slots de temps. A chaque nœud est attribué un ou plusieurs slots par trame, selon un algorithme d'ordonnancement approprié. Il utilise ces slots pour l'émission/réception de paquets de ou vers d'autres nœuds. Dans de nombreux cas, les nœuds sont regroupés pour former des clusters avec un cluster-head qui est chargé d'attribuer les slots de temps pour les nœuds de son cluster (par exemple, Bluetooth [16], LEACH [2], et Energy-aware TDMA-based MAC [15]). Les protocoles TDMA sont, par nature, efficaces en énergie, puisque les nœuds n'allument leurs radios que dans leurs propres slots et s'endorment le reste du temps.

- Technique basée sur la topologie hiérarchique

Lorsqu'un réseau est dense, sa gestion devient plus difficile. Les protocoles de routage basés sur une topologie plate fonctionnent bien quand le réseau ne comprend pas un grand nombre de nœuds. La structuration du réseau est l'un des outils principaux pour économiser l'énergie dans chaque nœud du réseau, ce qui permet de prolonger la durée de vie en conséquence. Une des structures les plus connues est la hiérarchisation. La technique de hiérarchisation sert à partitionner le réseau en sous-ensembles afin de faciliter sa gestion, surtout le routage qui se réalise à plusieurs niveaux. Dans ce type de protocoles, la vue du réseau devient locale ; certains nœuds peuvent avoir des rôles supplémentaires. La littérature comprend plusieurs contributions abordant les techniques de hiérarchisation du réseau. Le clustering (section 1.4) est l'une des méthodes les plus utilisées dans les protocoles qui se basent sur une topologie hiérarchique. Une autre structure utilisée est la chaîne [18]. Le principe d'une chaîne est qu'un nœud ne peut communiquer qu'avec deux voisins. Nous trouvons aussi des structures qui combinent les clusters et les chaînes. En se basant sur une architecture hiérarchique, plusieurs protocoles de routage pour les réseaux de grande taille ont été proposés.

- Technique basée sur la mobilité du collecteur

La mobilité du collecteur est une technique d'optimisation d'énergie très intéressante qui permet d'étendre la durée de vie du réseau en optimisant la consommation d'énergie au niveau des nœuds capteurs.

Dans un réseau de capteurs statiques, les données provenant des nœuds suivent des chemins multi-sauts vers la station de base. Ainsi, certains chemins peuvent être chargés (sollicités plus que d'autres) et les nœuds proches de la station de base relayent plus de données et sont plus sujets à l'épuisement prématuré de leur batterie [19]. La mobilité du collecteur (éventuellement, la station de base) permet d'équilibrer la charge entre les différents nœuds du réseau. Les nœuds statiques attendent le passage d'un dispositif mobile appelé collecteur pour lui envoyer leurs données de telle sorte que la communication ait lieu à proximité. Cela permet la réduction de la portée de communication afin d'économiser les énergies des nœuds capteurs. En outre, le dispositif mobile peut se déplacer dans le réseau afin de répartir uniformément la consommation d'énergie due à la communication.

1.10 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil constituent une technologie récente et innovante qui suscite un intérêt considérable étant donné son utilité dans différents domaines. Cependant, il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans des conditions optimales. L'un des problèmes qu'on peut rencontrer dans ce genre de réseau est la consommation d'énergie au niveau des capteurs lors de la transmission de leurs données à la station de base qui peut être assez éloignée de ces derniers. De ce fait plusieurs travaux se sont intéressés, en premier lieu, à la problématique de l'économie d'énergie au niveau des capteurs et l'amélioration de la durée de vie du réseau. Nous allons à travers le chapitre suivant explorer les techniques basées sur la mobilité pour la préservation de l'énergie dans les RCSFs.

Chapitre 2

Les réseaux de capteurs sans fil mobiles

Les réseaux de capteurs sans fil traditionnels s'appuient sur des nœuds statiques. Ces réseaux peuvent être utilisés dans des applications telles que les applications commerciales, environnementales, les systèmes de surveillance, de repérage, etc. Néanmoins avec l'avancée technologique, la mobilité est de plus en plus envisagée. Étant donné que les nœuds dans un réseau de capteurs sans fil sont des dispositifs électroniques, portables et de petite taille, ils peuvent être facilement couplés à des entités mobiles telles que des véhicules, des robots, des animaux ou des personnes. Par conséquent, dans les réseaux de capteurs sans fil, il est essentiel de prendre en charge des mécanismes de mobilité efficaces, sans compromettre le fonctionnement principal de l'application et la durée de vie du réseau. La mobilité dans les réseaux de capteurs sans fil a été abordée sous plusieurs angles et vise différents objectifs, ce qui a conduit à diverses solutions. Dans ce chapitre, nous étudions l'aspect mobilité dans les RCSFs.

2.1 Introduction

La concentration du trafic de données autour d'une station de base fixe provoque l'épuisement des nœuds capteurs à proximité de cette dernière. Pour remédier au problème de perte de données et de connectivité suite à l'épuisement des nœuds capteurs qui acheminent les données captées à la station de base fixe, l'utilisation des stations de base mobiles est proposée. Les stations de base mobiles offrent un équilibre de charge implicite, en contribuant à une consommation d'énergie mieux répartie à travers le réseau. Un tel réseau peut s'appuyer sur un véhicule menu d'un appareil pour collecter les données au près des nœuds capteurs ou un drone guidé à distance qui se déplace d'un point à un autre pour collecter les données. Dans ce chapitre, nous étudions l'aspect mobilité dans les RCSFs. Nous aborderons également les modèles de mobilité de la station de base dans les RCSFs.

2.2 Caractérisation générale de la mobilité dans les RCSFs

Nous pouvons classer la mobilité dans les RCSFs selon deux aspects : le type de l'élément mobile et le type de mouvements (voir Figure 2.1).

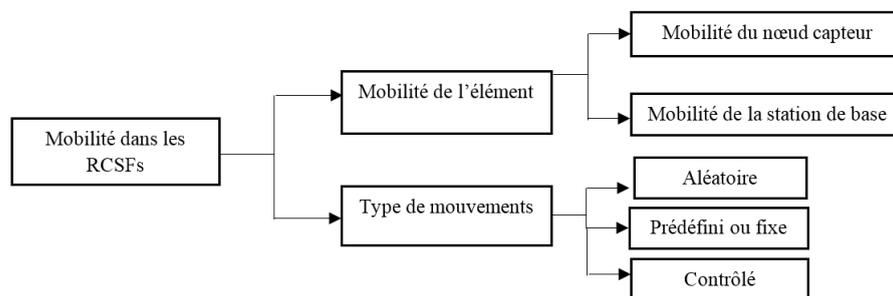


FIGURE 2.1 – Classification de la mobilité dans les RCSFs.

1. Type de l'élément mobile

Dans un RCSF, la mobilité peut être intégrée au niveau des nœuds capteurs et/ou au niveau de la station de base.

— **Mobilité des nœuds capteurs** : La mobilité d'un nœud capteur devient possible si le nœud a la capacité de se déplacer seul ou s'il est attaché à une

entité mobile. Robomote [20] est un exemple de la mobilité d'un nœud robot. Il s'agit d'un nœud capteur équipé de roues conçues pour un déploiement aisé et à faible coût. Le Robomote est également équipé de deux moteurs, d'un capteur infrarouge pour détecter les obstacles et d'une batterie rechargeable au soleil. Malgré l'intérêt et le potentiel de Robomote, la plupart des applications existantes reposent sur des nœuds attachés à des corps mobiles ou encore lorsque les nœuds capteurs bougent sous l'effet de facteurs externes tels que le vent, eau, ..., etc.

Face à la mobilité des nœuds, le réseau doit se réorganiser assez fréquemment pour pouvoir fonctionner correctement. Le problème de la conservation de l'énergie des nœuds devient plus compliqué car les techniques de géolocalisation sont coûteuses en terme d'énergie et elles vont devoir être sollicitées plus fréquemment.

- **Mobilité de la station de base** : La mobilité de la station de base a été introduite dans le but de rapprocher les nœuds de ce point névralgique afin d'économiser l'énergie. Un deuxième objectif consiste à éviter le coût élevé du maintien de longs chemins multi-sauts.

2. Type de mouvements

La mobilité dans les RCSFs peut également être classée en fonction du type de mouvement de l'élément mobile. Les types les plus cités dans la littérature sont : aléatoire, prédéfini et contrôlé. Un mouvement aléatoire signifie que l'entité en mouvement (qu'il s'agisse d'une station de base ou d'un capteur) se déplace de manière aléatoire dans la zone d'intérêt. Un mouvement prédéfini signifie que l'entité se déplace sur un chemin spécifique, avec une vitesse connue, atteignant chaque point d'intérêt à des instants connus et spécifiques. Enfin, un mouvement contrôlé signifie que le mouvement de l'entité est contrôlé par une entité externe en temps réel.

Dans notre travail, nous nous intéressons en premier lieu à la mobilité de la station de base qui est principalement sollicitée dans le but d'optimiser la durée de vie du réseau, en évitant les goulots d'étranglement qui peuvent se former autour des stations de base statiques. Ensuite nous nous intéressons aux RCSFs totalement mobiles. Dans ce dernier cas, nous travaillons sur les aspects de sécurité des communications.

2.3 Mobilité de la station de base

Dans les réseaux de capteurs sans fil un grand nombre de nœuds capteurs transmettent via des communications multi-sauts les données collectées vers la station de base. Les nœuds capteurs qui sont proches de la station de base épuisent leurs énergies beaucoup plus rapidement que les nœuds capteurs distants car ils ont une charge de trafic très importante. Ce phénomène est appelé phénomène d'entonnoir (*hotspot* ou *funneling problem*). Ceci est dû au fait qu'ils transmettent leurs propres données ainsi que les données des nœuds capteurs éloignés provoquant ainsi l'épuisement de la durée de vie du réseau.

Selon le modèle de transmission de données nommé multi-sauts représenté sur la Figure 2.2, les paquets de données sont envoyés à la station de base grâce aux différents nœuds capteurs intermédiaires. Les nœuds capteurs les plus proches de la station de base épuisent leur énergie plus rapidement que les nœuds éloignés, alors que les plus éloignés, leurs énergies peuvent durer plus longtemps. La raison est simple, comparé avec les capteurs éloignés de la station de base, les capteurs les plus proches, impliqués dans plusieurs chemins (capteur-station de base), ont une charge élevée de relais de messages et ainsi ils consomment plus d'énergie. Si les capteurs autour de la station de base épuisent leur énergie, une grande quantité de données ne peut pas atteindre la station de base. Cette dernière reste isolée du réseau car le remplacement ou le rechargement de la batterie du capteur est souvent difficile voire impossible dans certains cas. Ce qui mène à une sévère dégradation de la performance du réseau. Ainsi, les nœuds capteurs à un seul saut de la station de base auront besoin de plus de ressources de calcul et de communication pour assurer cette fonction de relais pour les autres nœuds capteurs qui sont loin de la station de base [21].

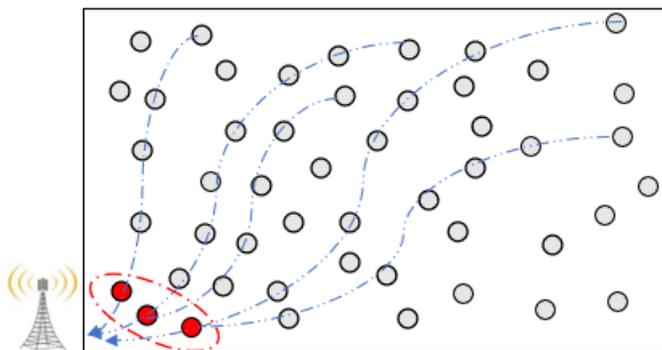


FIGURE 2.2 – Communication multi-sauts et le phénomène d'entonnoir (*hotspot*).

Dans la Figure 2.2, les nœuds capteurs encerclés sont notés comme nœuds fortement chargés. Selon les chemins de transmission de données, qui sont désignés par des lignes discontinues dans cette figure, les nœuds capteurs encerclés sont responsables de retransmettre les données des autres nœuds capteurs. En conséquence, la dissipation d'énergie de ces nœuds est plus rapide. Cependant, le déplacement périodique de la station de base permet de résoudre ce problème en distribuant la charge du trafic entre les nœuds capteurs et prolonger considérablement la durée de vie du réseau.

2.3.1 Architecture d'un RCSF avec station de base mobile

Lorsque la station de base est mobile, elle se déplace autour ou à l'intérieur du réseau pour la collecte de données. Un réseau de capteurs sans fil muni d'une station de base mobile est généralement constitué de :

- **Nœuds capteurs** : déployés dans une zone de captage pour collecter des données ou détecter des événements.
- **Station de base mobile** : c'est un dispositif électronique considéré comme un point de collecte de données, elle ne possède aucune contrainte énergétique ce qui lui permet de se déplacer autour ou à l'intérieur de la zone de captage à l'aide d'un support mobile (voiture, robot, animal ou humain). Selon l'application, la station de base collecte les données captées par les nœuds soit directement (en parcourant et en collectant les données de chaque capteur dans le réseau) ou bien indirectement à travers des nœuds intermédiaires. La station de base peut utiliser les données provenant des capteurs de manière autonome ou les rend disponibles pour l'utilisateur final à travers une connexion internet, satellite, ... etc.
- **Nœud relais** : c'est un nœud qui peut avoir (ou non) plus de ressources que les nœuds du réseau et qui a le rôle d'agrèger les informations captées de ses nœuds voisins et de les acheminer vers d'autres nœuds relais ou vers la station de base.

L'idée générale de cette approche de la mobilité de la station de base est de conserver l'énergie des nœuds capteurs en leur évitant d'envoyer leurs données sur des grandes distances et de réduire la perte de données ce qui permet d'étendre la durée de vie du réseau. En outre, les nœuds capteurs intermédiaires qui servent de relais vont changer en fonction de l'emplacement de la station de base mobile, ce qui assure un équilibrage de charge énergétique entre tous les nœuds capteurs du réseau.

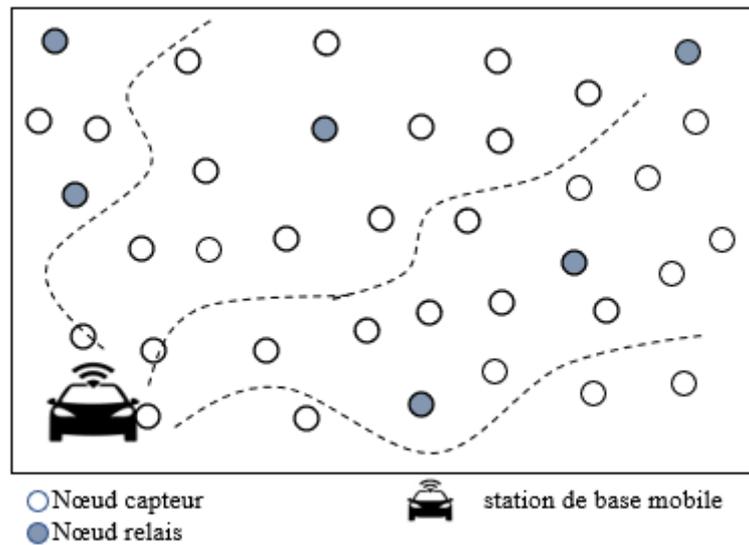


FIGURE 2.3 – Architecture d'un RCSF avec station de base mobile.

2.3.2 Avantages de l'utilisation d'une station de base mobile

Les réseaux de capteurs sans fil présentent plusieurs contraintes en termes d'énergie, de calcul et de bande passante. Le principal objectif de tels réseaux est d'assurer les communications entre les capteurs sans fil et la station de base et d'éviter les pertes de données qui peuvent influencer sévèrement les performances du réseau. La station de base est un dispositif électronique qui ne possède aucune contrainte en termes de ressources (énergétique, puissance de calcul et traitement et capacité de communication). L'utilisation d'une station de base mobile dans un réseau nous permet d'améliorer nettement les performances du réseau par rapport aux réseaux avec une station de base statique. Dans ce qui suit, nous détaillons les avantages de l'utilisation des stations de base mobiles.

- Consommation d'énergie

L'énergie est l'une des contraintes les plus importantes dans les réseaux de capteurs sans fil. Afin de maximiser la durée de vie du réseau, les protocoles de routage doivent prendre en considération cet aspect. Cependant, plusieurs études ont montré les limites des approches utilisant des stations de base statiques [22, 23, 24]. En effet, la station de base joue le rôle d'une passerelle entre le réseau de capteurs sans fil et l'utilisateur final.

Par conséquent, tout le trafic généré dans le réseau converge vers ce point névralgique, ceci augmente la charge que doivent supporter les nœuds les plus proches de la station de base et limite ainsi la durée de vie du voisinage et du réseau tout entier. Ainsi, la consommation énergétique au niveau du voisinage immédiat de la station de base statique augmente progressivement avec le temps jusqu'à ce que la station de base se retrouve déconnectée du réseau à cause de la disparition de tous ses nœuds capteurs voisins immédiats. La mise en œuvre d'une station de base mobile permet d'éviter ce problème en répartissant la charge du réseau ainsi que la consommation énergétique de manière plus uniforme au niveau de tous les nœuds capteurs, ce qui permet d'augmenter la durée de vie du réseau et de minimiser la perte de données.

- Connectivité du réseau

Les réseaux de capteurs sans fil sont caractérisés généralement par une forte densité de nœuds capteurs déployés sur une zone d'intérêt assurant la bonne connectivité du réseau. Cependant, la forte contrainte énergétique des nœuds capteurs peut causer la disparition de certains nœuds. De ce fait, le réseau se trouve partitionné en plusieurs parties non connexes. La mise en œuvre d'une station de base mobile permet d'améliorer la connectivité du réseau en collectant les données à partir de plusieurs parties isolées du réseau.

- Fiabilité du réseau

Étant donné que la densité et la communication multi-sauts sont parmi les caractéristiques les plus exigées par les applications des réseaux de capteurs sans fil, la fiabilité d'un réseau est compromise par les interférences et les collisions et la perte de données. L'utilisation d'une station de base mobile, permet de visiter les nœuds du réseau et de collecter les données directement via des transmissions à un seul saut. Cela réduit non seulement les interférences et les collisions, mais également la perte de données.

- Passage à l'échelle

Le nombre de capteurs sans fil déployés dans la zone de captage peut atteindre des milliers de nœuds. Les protocoles de communication doivent donc être capables de fonctionner avec un tel nombre de nœuds capteurs. Les protocoles traditionnels de diffusion de données de type inondation (*flooding*) ne permettent généralement pas le passage à l'échelle vu le grand nombre de messages générés [25, 26]. De ce fait, l'utilisation d'une station de base statique serait complètement inadaptée, vu que tout le trafic généré dans le réseau serait condensé au niveau de la station de base, limitant la durée de vie du réseau et augmentant les collisions au niveau du voisinage immédiat de la station de base. L'utilisation de stations de base mobiles qui se déplacent dans les régions du réseau permet un meilleur passage à l'échelle en répartissant le trafic du réseau et la consommation énergétique à travers tous les nœuds capteurs déployés.

- Nature de l'application

Certaines applications des réseaux de capteurs sans fil peuvent exiger l'usage de stations de base mobiles et/ou de capteurs mobiles. Des exemples sont : réseaux de capteurs intelligents (la station de base vient relever les capteurs), surveillance d'animaux ou de personnes, etc. Dans ces cas, la station de base est attachée au niveau de véhicules, d'animaux ou de personnes en mouvement autour d'une zone géographique.

- Sécurité

L'utilisation d'une station de base mobile permet de réduire la probabilité d'écouter les informations échangées dans le réseau par un tiers ce qui rend le réseau moins exposé aux menaces de sécurité. En effet, dans un réseau de capteurs sans fil avec une station de base statique, les attaques peuvent cibler ce point névralgique facilement localisable. Ce qui fait de la mobilité une technique pour renforcer la sécurité du réseau. Un autre point essentiel pour tout système de sécurité de communications qui est la gestion de clés cryptographique (que nous traitons au chapitre 5 de notre thèse), et qui peut profiter de la mobilité de la station de base pour réduire les menaces dans un RCSF. Par exemple, pour rafraîchir les clés cryptographique d'un nœud capteur la station de base se déplace vers la position du nœud en question pour lui transmettre ses nouveaux

clés avec une communication à un seul saut.

2.4 Contraintes et défis

L'usage d'une station de base mobile pour la collecte de données dans un RCSF présente plusieurs avantages mais n'est pas sans conséquences. En effet, la mobilité soulève plusieurs défis à relever pour une conception et une mise en œuvre efficace d'un schéma de collecte. Voici quelques défis spécifiques à l'introduction des stations de base mobiles dans les RCSFs :

- Gestion de la mobilité

La mobilité de la station de base engendre une problématique liée à la gestion des communications entre les nœuds capteurs fixes et la station de base mobile. Pour mieux comprendre cette problématique, considérons le scénario suivant : afin de collecter les données produites par les nœuds capteurs avoisinants, la station de base mobile circule dans une zone géographique tout en émettant une requête. On appelle résolveur de requêtes, le nœud capteur recevant la requête de la station de base et qui a pour tâche, l'acheminement de cette requête vers les nœuds capteurs ayant les données correspondantes. Lorsque le résolveur reçoit les données et la station de base n'est plus à la portée de communication de ce dernier, la communication ne pourra pas avoir lieu. Pour remédier à ce problème, de nouvelles techniques de communication doivent être mises en œuvre pour assurer la communication entre les stations de base mobiles et le reste du réseau.

- Localisation de la station de base

Dans un réseau de capteurs sans fil, les informations recueillies par les nœuds capteurs sont transmises vers la station de base. Dans le cas d'un réseau avec une station de base statique, les informations sont directement transmises vers cette station de base. En revanche, quand la station de base est mobile, les nœuds capteurs n'ont à priori aucune connaissance de sa position courante au sein du réseau. L'emplacement

de la station de base doit être connu par les nœuds capteurs qui sont dans sa portée de communication et mis à jour dans tout le réseau pour assurer la connectivité. La mise à jour régulière de l'emplacement de la station de base dans le réseau pourrait réduire les délais de transmission vu que les chemins vers la station de base sont ajustés en conséquence. De plus, la localisation de la station de base est très influencée par sa vitesse et par les périodes d'activités des nœuds, puisqu'un nœud en mode veille ne sera pas en mesure de détecter la présence de la station de base.

- Gestion de la période d'activité en fonction de la mobilité

Pour propager les mises à jour de la localisation de la station de base, les nœuds capteurs ont besoin d'être en mode écoute. Si le mouvement de la station de base est prédit ou calculé, il pourrait aider les nœuds à optimiser la détection de la station de base. Dans les situations où les heures de visite sont connues à priori ou calculables avec une certaine précision, les cycles de service des nœuds peuvent être ajustés pour les mettre en mode actif à l'heure d'arrivée prévue de la station de base. Cependant, ceci est réalisable dans des situations où la station de base suit une trajectoire déterminée tout en conservant une vitesse constante.

- Latence

La latence dépend directement du modèle de mobilité de la station de base à savoir la vitesse et la direction. Cependant, la latence est fortement influencée par la période de pause de la station de base mobile. Dans certaines applications, la station de base se dirige vers chaque nœud pour collecter les données. Dans tels scénarios, si les données sont trop volumineuses pour être transmises à la station de base durant le temps de contact, les nœuds devront attendre la prochaine tournée de la station de base mobile ce qui engendre une augmentation de la latence. Il y a toujours un compromis entre la consommation d'énergie et la latence dans un RCSF. La latence dépend directement du modèle de mobilité de la station de base. Si les dernières informations sur l'emplacement de la station de base ainsi que les informations sur sa mobilité sont rapidement propagées dans l'ensemble du réseau, le délai de bout en bout de latence peut être réduit en permettant aux nœuds d'ajuster leurs chemins vers la station de base. Cependant, cela provoquerait une énorme consommation d'énergie et diminuerait ainsi la durée de vie du réseau.

- Perte de paquets

En raison de l'indisponibilité des chemins fixes vers la station de base, les données sont transmises par chaque nœud capteur vers la dernière position connue de la station de base mobile. En revanche, si la dernière information de mobilité ne se propage pas dans l'ensemble du réseau, la transmission des messages serait compromise. Ce problème se complique d'avantage quand la station de base mobile se serait éloignée de sa dernière position de manière significative, entraînant finalement la perte des données en raison d'un temps de parcours long.

2.5 Le mouvement de la station de base

L'utilisation d'une station de base mobile permet d'optimiser la consommation d'énergie au niveau des nœuds capteurs, mais le contrôle du mouvement de la station de base pour une meilleure récolte de données est indispensable. Le terme mouvement de la station de base se réfère à la voie physique que la station de base mobile suit en se déplaçant dans le réseau. Nous distinguons trois principaux modèles de mobilité de la station de base étudiés dans la littérature : mobilité aléatoire, mobilité prévisible ou fixe et mobilité contrôlée ou optimisée.

2.5.1 Modèle de mobilité Aléatoire

Comme son nom l'indique, le modèle de mobilité aléatoire (Figure 2.4) d'une station de base mobile comprend une suite de chemins de longueur et de direction quelconques. Le temps de séjour de la station de base entre les différents déplacements, peut également être aléatoire. La station de base est autonome dans son mouvement.

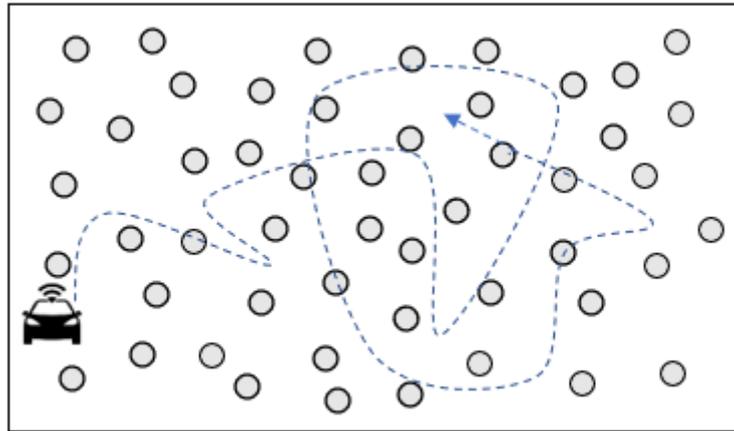


FIGURE 2.4 – Modèle de mobilité Aléatoire.

- **Avantage** : Dans les réseaux de capteurs multi-sauts, le modèle de la mobilité aléatoire est généralement très efficace vis-à-vis du phénomène *hotspot*, le changement aléatoire de l'emplacement de la station de base implique la distribution aléatoire du trafic et de la charge du routage à travers le réseau, ce qui minimise la probabilité que l'un des nœuds du réseau épuise son énergie et meurt beaucoup plus tôt que les autres nœuds.
- **Inconvénient** : Dans les réseaux de capteurs à un saut, le modèle de mobilité aléatoire peut impliquer de longs délais entre le moment où une lecture sensorielle est prise et le moment où le capteur respectif est visité (la lecture est récupérée) par la station de base. La faisabilité de la mobilité aléatoire de la station de base est très douteuse. À savoir, la plupart des environnements du monde réel des réseaux de capteurs contiennent des obstacles (murs, meubles, machines dans l'environnement intérieur et des rochers, des montagnes, des arbres dans les environnements extérieurs). Par conséquent, dans de tels environnements, il semble très peu probable, voire impossible, qu'une station de base puisse se déplacer aléatoirement dans la zone d'intérêt du réseau dans n'importe quelle direction, à n'importe quelle distance, suivant une ligne droite.

2.5.2 Modèle de mobilité prévisible

Contrairement à la mobilité aléatoire, la mobilité prévisible (ou fixe) est totalement déterministe. Avec ce type de mobilité, la station de base suit en permanence le même chemin à travers le réseau (voir Figure 2.5). La mobilité prévisible est généralement

imposée à la station de base mobile par la nature du terrain physique et/ou la présence des obstacles dans l'environnement. Un exemple d'étude de recherche qui traite ce type de mobilité est présenté dans [27]. L'étude porte sur l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil pour suivre les places de parking gratuites et de fournir cette information aux voitures à l'entrée du parc de stationnement. Dans cette étude, les voitures sont modélisées comme des stations de base mobiles (c.à.d. destinataires finaux et des utilisateurs des données collectées) qui, par la nature de la conception de parking, devraient suivre une trajectoire déterministe bien définie.

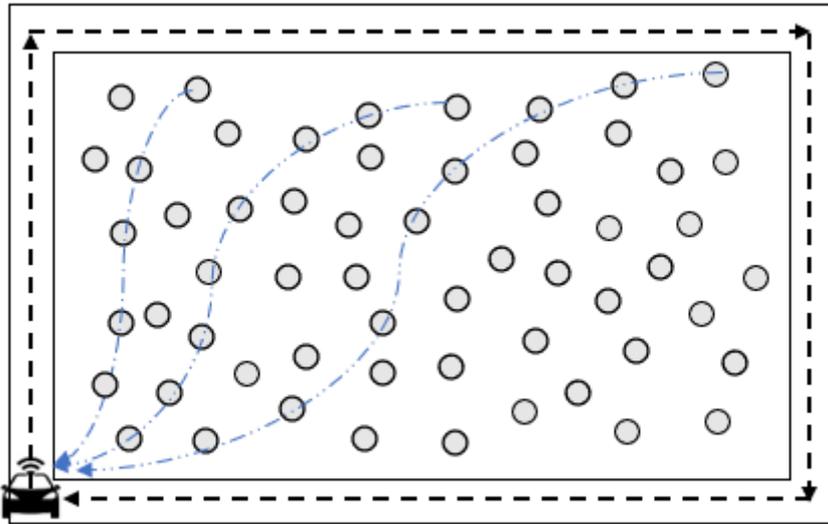


FIGURE 2.5 – Modèle de mobilité prévisible.

- **Avantage** : Les environnements des réseaux de capteurs sans fil du monde réel, en particulier ceux trouvés dans les milieux urbains et industriels, sont connus par la présence des petits et grands obstacles. Dans ces environnements, une trajectoire limitée à un nombre restreint de chemins semble être la plus probable, ce qui rend la mobilité prévisible un modèle beaucoup plus réaliste pour le mouvement de la station de base que les deux autres types de mobilité.
- **Inconvénient** : Dans les réseaux de capteurs multi-sauts, la mobilité prévisible est généralement moins efficace contre le phénomène de *hotspot* que les deux autres modèles de mobilité. Plus précisément, en se déplaçant le long d'un ensemble limité (et éventuellement prédéfini) de chemins, la capacité de la station de base pour distribuer le trafic et la charge de routage est également limitée. En outre, dans les réseaux de capteurs mono-saut, l'incapacité de la station de base pour atteindre toutes les zones du champ de réseau peut dégrader les

performances de ce dernier.

2.5.3 Modèle de mobilité contrôlée

Dans le cas de la mobilité contrôlée (ou optimisée), le chemin de la station de base est une fonction d'une variable de réseau particulière (par exemple l'état actuel de l'énergie des nœuds, la portée des nœuds, la densité des nœuds, la direction des flux de circulation, etc.). Le chemin est ajusté en permanence pour assurer une performance optimale du réseau en ce qui concerne une ou plusieurs mesures de performance. Dans [28], les auteurs présentent un RCSF multi-sauts dans lequel la station de base mobile reçoit des mises à jour régulières sur l'état actuel de l'énergie des nœuds. Basé sur ces mises à jour, la station de base maintient le réglage de sa position de manière à minimiser la charge de routage sur les nœuds avec des niveaux critiques d'énergie. Les auteurs de [29], ont étudié un réseau de capteurs pour la surveillance de la pollution, dans lequel les nœuds déployés dans différentes zones du réseau fonctionnent à différentes fréquences de prélèvement. Le chemin de la station de base à travers le réseau est contrôlé par ces taux de fréquence, dans le but de réduire au minimum la probabilité que l'un des tampons des nœuds capteurs déborde. Dans [33], les auteurs ont proposé une autre approche pour la mobilité de la station de base dans laquelle la station de base mobile se déplace vers le nœud ayant la plus haute énergie résiduelle.

- **Avantage** : L'analyse ci-dessus montre que la nature et la forme physique des trajectoires aléatoires et prévisibles ne sont, en aucune façon, liées à l'état et/ou aux événements survenant à l'intérieur du réseau de capteurs correspondant. D'autre part, la forme physique de la trajectoire optimale est destinée à être entièrement contrôlée à l'intérieur du réseau, dans le but d'optimiser un ou plusieurs aspects de performance du réseau. Par conséquent, la trajectoire contrôlée (optimisée) apporte plus d'amélioration dans les performances du réseau que les deux autres modèles de mobilité de la station de base.
- **Inconvénient** : Dans la plupart des approches proposées utilisant la mobilité optimisée, la forme de la trajectoire est supposée être contrôlée à l'intérieur du réseau. Néanmoins, comme déjà mentionné, l'existence d'obstacles dans le monde réel de l'environnement des réseaux de capteur sans fil est susceptible de contraindre le mouvement de la station de base (l'empêcher de suivre la trajectoire optimale théoriquement).

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la mobilité dans les réseaux de capteurs sans fil qui permet d'assurer un bon équilibrage de charge entre les nœuds capteurs et de prolonger considérablement la durée de vie du réseau. Plus précisément, nous avons détaillé la mobilité de la station de base qui est le cas le plus référencé dans la littérature et auquel correspondent le plus d'applications. Le chapitre suivant présente une synthèse des différentes approches de collecte de données qui exploitent la mobilité de la station de base afin d'améliorer les performances des réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre 3

Collecte de données et mobilité dans les RCSFs

La collecte de données est une tâche fondamentale dans les RCSFs. Plusieurs travaux ont été proposés pour optimiser cette collecte. Parmi les approches proposées, ceux basées sur l'utilisation d'une station de base mobile. Assister la collecte de données captées par une station de base mobile offre une optimisation énergétique au niveau des nœuds capteurs ce qui prolonge leur durée de vie et celle du réseau d'une part et minimise la perte de données d'autre part. Dans ce chapitre nous allons présenter une taxonomie des approches de collecte de données avec une ou plusieurs stations de base mobiles.

3.1 Introduction

Bien qu'un grand nombre d'applications mettent en jeu des RCSFs, ceux-ci ont plusieurs restrictions que ces applications doivent contourner. Par exemple, ils ont une faible puissance de calcul, une réserve d'énergie limitée et une bande passante réduite aux connexions sans fil entre nœuds capteurs. Un des principaux objectifs dans la conception d'un RCSF est la transmission fiable de données via une heuristique de préservation d'énergie et de prévention de perte de connectivité (e.g. aucun nœud isolé). Ceci est fait par l'utilisation d'une politique stricte de gestion d'énergie. En effet, la principale source de consommation d'énergie d'un capteur est l'utilisation des communications sans fil via son module de radiocommunication.

Les approches de collecte de données dans les RCSFs sont influencées par un facteur déterminant à savoir la consommation d'énergie sans perte d'efficacité. Les nœuds capteurs utilisent leur réserve d'énergie à des fins de calcul et de transmission de données. La durée de vie d'un nœud capteur dépend essentiellement de celle de sa batterie. Dans un RCSF, chaque nœud capteur joue le rôle d'émetteur et de routeur. La défaillance énergétique d'un nœud capteur peut changer significativement la topologie du réseau et imposer une réorganisation coûteuse de ce dernier. De nombreuses approches de collecte de données ont été proposées pour les RCSFs. Certaines sont des adaptations de stratégies qui existaient pour d'autres types de réseaux (principalement pour les réseaux sans fil au sens le plus large) tandis que d'autres ont été conçues spécialement pour les réseaux de capteurs sans fil.

L'exploitation de la mobilité pour les réseaux sans fil en général et capteurs en particulier est devenue une issue importante et a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche [32]. La mobilité est utilisée pour alléger le trafic et équilibrer la charge afin d'améliorer la consommation énergétiques et prolonger la durée de vie des RCSFs.

Nous nous sommes intéressés aux approches basées sur la mobilité de la station de base afin d'optimiser la collecte de données. En effet, dans un RCSF où la station de base est fixe, les nœuds capteurs à un saut de la station de base consomment leur énergie plus rapidement par rapport aux autres nœuds capteurs non-adjacents à la station de base. Si la station de base change de position, elle peut optimiser la collecte de données en terme d'énergie et minimiser la perte de données. Dans ce chapitre nous allons présenter une taxonomie des approches de collecte de données avec une ou plusieurs stations de base mobiles.

3.2 Classification des approches de collecte de données avec une ou plusieurs stations de base mobiles

La plupart des classifications des approches de collecte de données avec une ou plusieurs stations de base mobiles se basent sur le modèle de mobilité utilisé [31, 32, 33] : approches basées sur la mobilité aléatoire, approches basées sur la mobilité déterminée et approches basées sur la mobilité contrôlée.

Nous proposons dans ce qui suit de classer les approches de collecte de données en fonction de leur objectif principal. Les approches de collecte de données avec une ou plusieurs station de base mobiles visent à satisfaire principalement l'un des points suivants : (1) prolonger la durée de vie du réseau, (2) améliorer le temps de latence de livraison des données, (3) améliorer la performance de livraison de paquets afin de garantir un niveau faible de perte de données. Le but de cette classification et de cette étude comparative est de permettre aux intéressés par un objectif particulier d'évaluer et de sélectionner la solution appropriée en fonction de leurs applications.

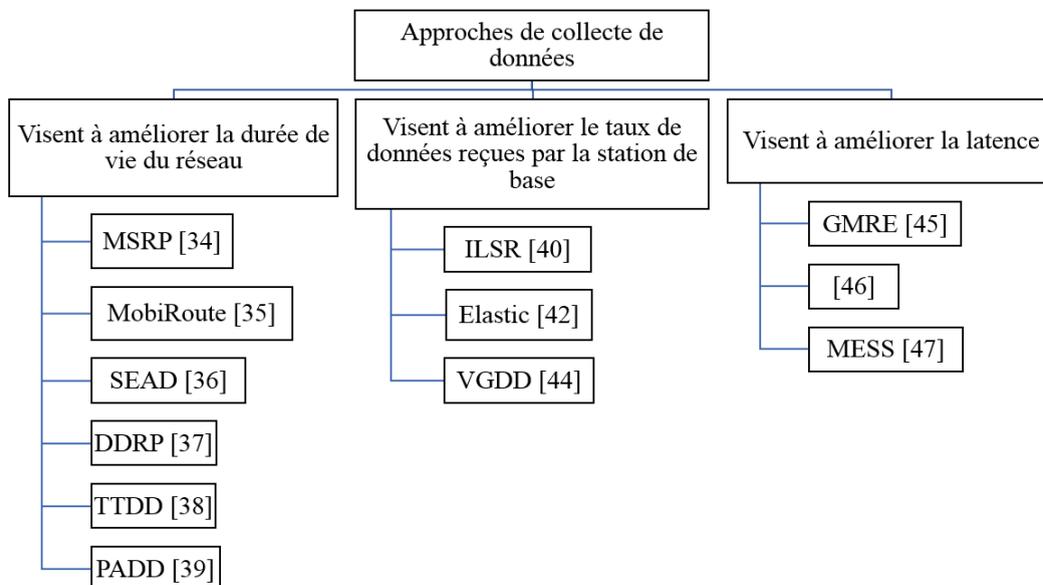


FIGURE 3.1 – Classification des approches de collecte de données avec une ou plusieurs stations de base mobiles.

La Figure 3.1 représente notre classification des solutions proposées. Nous présen-

tons dans ce qui suit chaque solution.

3.2.1 Approches qui visent à améliorer la durée de vie du réseau

MSRP (Mobile Sink Based Routing Protocol)

Dans [34], les auteurs proposent un protocole de routage hiérarchique basé sur les clusters avec une station de base mobile et des nœuds capteurs fixes. L'approche est nommée MSRP (*Mobile Sink based Routing Protocol*). MSRP veut résoudre le problème *hotspot* discuté dans le chapitre précédent. Un Cluster-Head (CH) collecte les données à partir de ses nœuds membres et attend l'arrivée de la station de base mobile. Le temps est divisé en cycles où chaque cycle est un intervalle de temps fixe. Dans le premier cycle, la station de base doit simplement se déplacer vers des positions prédéfinies dans le réseau. Lors de la collecte de données, la station de base garde trace des données relatives à l'énergie résiduelle des CHs. A partir du deuxième cycle, la station de base se déplace en se basant sur l'énergie résiduelle des CHs et elle favorise le CH ayant l'énergie résiduelle la plus élevée. Lorsque la station de base se déplace vers sa nouvelle position elle diffuse un plan TDMA à tous les CHs dans sa zone de couverture. Chaque CH suivra le plan pour transmettre ses données. La station de base mobile recueille les données non seulement des CHs, mais aussi d'autres nœuds voisins lors de son déplacement.

Discussion : Le principal avantage de ce protocole est que le phénomène *hotspot* est évité grâce à la mobilité de la station de base. Cependant, il ne prend pas en compte la latence et les pertes de paquets associées à la mobilité de la station de base. En utilisant cette approche, la station de base se déplace toujours vers des zones riches en énergie, provoquant ainsi une très grande latence dans des régions du réseau où certains événements se produisent le plus souvent mais l'énergie résiduelle des capteurs qui s'y trouvent est relativement faible.

MobiRoute

Dans [35], les auteurs proposent MobiRoute, une approche qui utilise une station de base mobile pour équilibrer la charge et la consommation d'énergie dans le réseau

et ainsi améliorer la durée de la vie du réseau. MobiRoute est basée sur le protocole de routage Berkeley MintRoute [49]. Les nœuds capteurs envoient leurs données en utilisant des communications multi-sauts de manière périodique. La station de base utilise un modèle de mobilité selon lequel elle se déplace en suivant des points bien déterminés (des points cibles) avec des pauses temporaires au niveau de ces points. L'intervalle de temps de pause de la station de base est beaucoup plus grand que le temps de déplacement entre deux points cibles, ce qui permet d'éviter l'ajustement fréquent des routes d'acheminement vers la station de base et par conséquent réduit la surcharge du protocole de routage. La station de base établit la liaison avec les nœuds voisins en envoyant des messages de type *beacon*. Afin d'éviter la propagation des changements topologiques brusques et fréquents de la station de base mobile, la mise à jour de sa position dans le réseau n'est faite que lorsqu'elle arrive à un point cible. En effet, durant le déplacement, la station de base peut passer par plusieurs nœuds et les liens avec eux peuvent ne plus être valides lorsqu'elle arrive à sa prochaine destination. MobiRoute utilise également un mécanisme de contrôle adaptative de la mobilité qui permet de créer des profils énergétiques des différentes zones du réseau. La station de base évite de s'arrêter à un point cible si son profil énergétique est extrêmement bas.

Discussion : MobiRoute équilibre la charge du trafic ce qui permet d'améliorer la durée de vie du réseau. En revanche quand l'intervalle de temps de pause de la station de base est beaucoup plus grand que le temps de déplacement entre deux points cibles, l'acheminement des données captées par des nœuds loins de la station de base consomme plus d'énergie [48].

SEAD (Scalable Energy-Efficient Asynchronous Dissemination)

Dans [36] les auteurs proposent SEAD, un protocole d'auto-organisation distribué qui vise à économiser l'énergie de communication afin de prolonger la durée de vie du réseau en utilisant plusieurs stations de base mobiles. SEAD construit un arbre de dissémination (appelé d-arbre) au-dessus du réseau physique en définissant certains nœuds de l'arbre comme points d'accès. Chaque station de base mobile se rattache et s'enregistre auprès du point d'accès le plus proche qui devient par la suite le point d'accès de la station de base et s'occupe de la livraison des données. Lorsque la station de base se déplace hors de la portée de ce point d'accès, la route est étendue en ajoutant de nouveaux points d'accès afin de garantir la présence d'un chemin vers la station de base mobile. L'arbre construit est utilisé par la station de base afin de diffuser ses

requêtes et récupérer les données collectées par les capteurs. Toutefois, pour éviter la reconstruction fréquente de l'arbre. La station de base ne choisit un autre point d'accès que lorsque le nombre de sauts entre la station de base et le nœud d'accès dépassent un certain seuil. Quand un nouveau nœud d'accès est sélectionné, l'ancien nœud d'accès est informé. Cette stratégie est adoptée pour maintenir le compromis entre la consommation d'énergie dans la reconstruction de l'arbre et le délai. En outre, pour diffuser les données à plusieurs stations de base, un ensemble de nœuds entre le point d'accès et les stations de base sont choisis comme réplique (nœud à partir duquel une branche vers le nouveau point d'accès est étendue) qui conserve les données du point d'accès temporairement. Un exemple du modèle d'arbre SEAD est représenté sur la Figure 3.2.

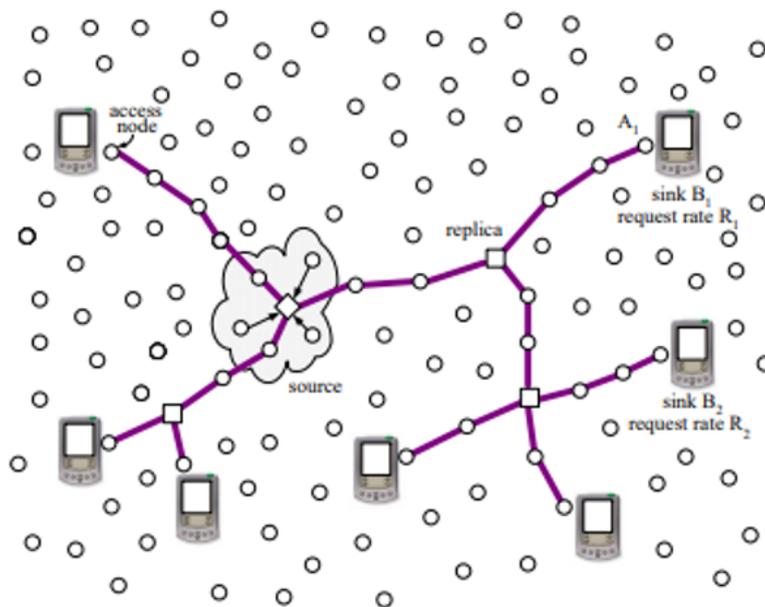


FIGURE 3.2 – Modèle d'arbre de dissémination de données dans SEAD [36].

Discussion : SEAD permet une meilleure consommation d'énergie, en évitant la reconstruction fréquente du d-arbre. Cependant, il engendre des délais supplémentaires (quelques multi-sauts supplémentaires vers la dernière position de la station de base) et il n'est donc pas adapté aux applications sensibles au délai. En outre, pour maintenir le d-arbre, et même si le point d'accès n'a plus de données à envoyer, il envoie toujours des messages aux stations de base, ce qui entraîne une consommation d'énergie inutile.

DDRP (An efficient Data-Driven Routing Protocol for wireless sensor networks with mobile sinks)

Dans [37], les auteurs proposent un protocole de routage orienté données (Data-Driven Routing Protocol ou DDRP), qui vise à améliorer les performances de transmission de données à une station de base mobile tout en minimisant la surcharge de contrôle du réseau. Dans DDRP, lorsque la station de base se déplace dans le réseau elle diffuse des messages contenant sa position à son voisinage immédiat (ses voisins à un saut). Chaque nœud ajoute à ses paquets un champ supplémentaire, appelé *Dist2Sink* (distance jusqu'à la station de base), qui stocke la plus petite distance connue (nombre de sauts) vers la station de base en utilisant ce nœud. Au fur et à mesure que les paquets de données sont générés et transmis, la connaissance des itinéraires vers la station de base se propage sur tous le réseau. Pour les nœuds voisins à un seul saut de la station de base, $Dist2Sink = 1$ et pour d'autres, il pourrait être 2, 3, ..., K , en fonction de leur profondeur à l'intérieur du champ d'intérêt. K correspond à une certaine valeur maximale pour limiter le nombre maximum de sauts. Les nœuds dont *Dist2Sink* est égal à l'infini, ce qui signifie que le nœud n'a aucune route vers la station de base, attendent un certain temps pour découvrir une route valide vers la station de base. Toutefois, si aucune route n'est découverte, il utilise le modèle de mobilité aléatoire pour transmettre ses données vers une direction aléatoire jusqu'à ce que le paquet rencontre un nœud avec une route valide vers la station de base.

Discussion : DDRP réduit considérablement la surcharge du contrôle du réseau. Cependant l'ajout d'un champ supplémentaire dans les paquets pour mettre à jour la position de la station de base consomme plus d'énergie au niveau des nœuds [54].

TTDD (Two Tier data Dissemination)

Dans [38], les auteurs présentent un protocole de diffusion de données à deux niveaux appelé TTDD (*Two Tier Data Dissemination*). TTDD est basé sur une grille virtuelle conçu pour les réseaux à grandes échelle. TTDD est proposé pour permettre une diffusion efficace des données vers plusieurs stations de base mobiles en réduisant au minimum l'inondation pour mises à jour de l'emplacement de la station de base afin de maximiser la durée de vie du réseau. Il est considéré comme l'une des premières approches qui visent à résoudre les contraintes liées à la mobilité de la station de base avec un réseau organisé en grille de cellules. Lorsqu'un événement se produit, les cap-

teurs qui l'entourent travaillent en collaboration pour collecter les données sensorielles puis un nœud est sélectionné pour devenir le nœud source. Ce dernier initie de manière pro-active la construction d'une grille virtuelle autour de lui couvrant tout le réseau et devient un point de croisement de cette grille puis il sélectionne plusieurs nœuds de diffusion (les nœuds qui se trouvent dans une distance seuil par rapport au point de chaque cellule dans la grille). Afin de collecter toutes les données générées dans le réseau, la station de base mobile se rattache au capteur de croisement le plus proche et diffuse une requête qui sera acheminée jusqu'au nœud source. Ce dernier renvoie alors à la station de base mobile les données correspondantes en utilisant l'inverse du chemin emprunté par la demande de données.

Discussion : TTDD permet une optimisation considérable de l'énergie. Cependant, la taille des cellules doit être définie avec soin car elle a un impact direct sur la taille de la zone inondée et sur la construction et la maintenance du réseau. De plus, avec l'augmentation du nombre de nœuds sources, les performances de TTDD se dégradent considérablement, car la charge de communication liée à la construction et à la maintenance de la grille augmente, en particulier pour un réseau à grande échelle. De plus, la route adoptée pour livraison de données peut ne pas être la route optimale (nombre de sauts impliqués), ce qui pourrait compromettre le temps de latence de la livraison des données.

PADD (Power Aware Data Dissimination)

Afin de réduire la consommation d'énergie et de minimiser la surcharge du réseau liés à la collecte de paquets des données captées, les auteurs dans [39] proposent un protocole de dissémination de données nommé PADD (*Power Aware Data Dissimination*) pour les RCSFs avec stations de base mobiles. Plutôt que de propager les messages de requête de la station de base à tous les nœuds capteurs pour établir les informations liées au transfert de données, un nœud source construit au préalable une structure de grille de sorte que seuls les nœuds de dissémination situés aux points de la grille doivent acquérir les informations de transfert. La taille d'une cellule doit être adaptée afin de garantir à chaque nœud une communication directe avec ses huit nœuds de diffusion voisins contrairement à TTDD [38] où un nœud de diffusion ne peut envoyer un message qu'à ses quatre nœuds de diffusion voisins. En outre, les nœuds de diffusion ayant le plus d'énergie résiduelle sont sélectionnés pour créer un chemin de diffusion de données robuste et pour répartir uniformément la charge d'énergie dans le réseau. Lorsque la

station de base veut collecter des données, elle diffuse un message pour rechercher le nœud de diffusion le plus proche en tant qu'agent de transmission de la requête. Un chemin de diffusion de données est maintenu en mettant en cache une table d'informations de requête (QIT) dans chaque nœud de diffusion, de sorte que les données détectées puissent être efficacement transmises de la source aux stations de base. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité de PADD dans la réduction de la consommation d'énergie et la prolongation de la durée de vie du réseau en comparaison avec TTDD.

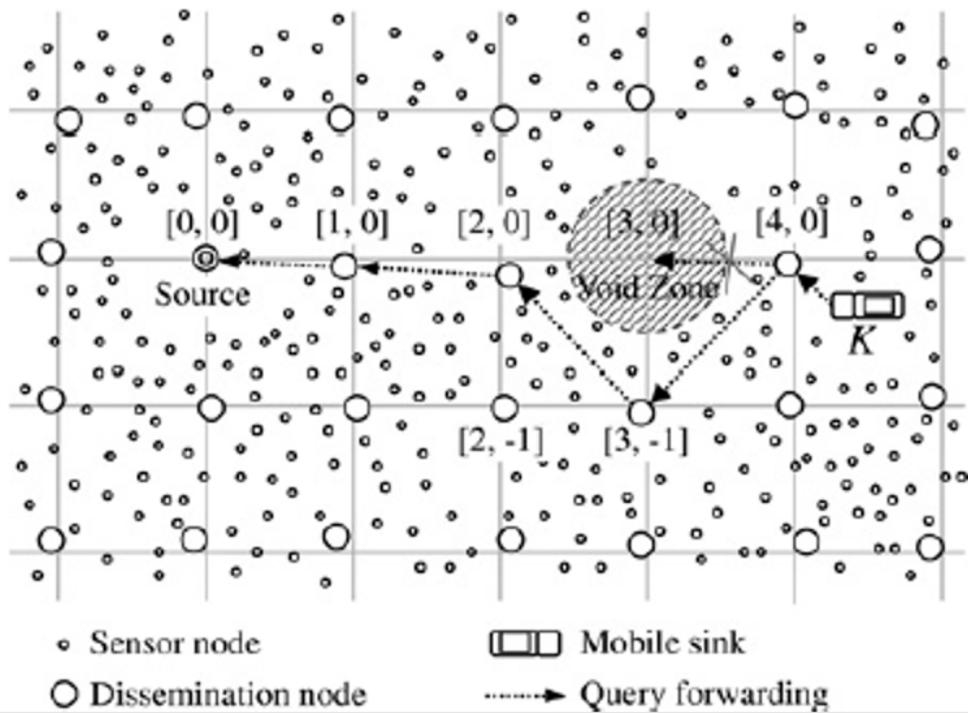


FIGURE 3.3 – PADD [39].

Discussion : PADD supporte l'utilisation de plusieurs stations de base mobiles. Seuls les nœuds de diffusion situés à des points de grille doivent transférer les données captées. Les autres nœuds capteurs s'endorment ce qui diminue la consommation d'énergie du réseau. Dans PADD, chaque fois qu'un événement est détecté, le nœud source lance l'opération de construction de la grille. Cela introduit un nombre important de messages dans un réseau fortement événementiel.

3.2.2 Approches qui visent à améliorer le taux de livraison de données

ILSR (Integrated Location Service and Routing)

Dans [40], les auteurs présentent une approche de routage géographique ILSR (*Integrated Location Service and Routing*) qui vise à garantir la livraison de données à la station de base mobile. Ils supposent que tous les nœuds capteurs dans le réseau, y compris la station de base, ont une connaissance sur leur position dans le réseau. Pour intégrer la mobilité de la station de base, ILSR améliore le protocole de routage GFG (*Geographical Forwarding Graph*) proposé dans [41], qui assure la livraison de données dans les réseaux statiques. Afin de gérer la mobilité de la station de base deux types de mises à jour d'emplacement ont été ajoutés. La station de base met à jour l'emplacement de ses nœuds voisins avant ou après la rupture d'un lien et chaque fois qu'une création de lien est observée. La mise à jour d'emplacement repose sur une inondation de messages restreinte dans la zone qui est près ou à proximité de la station de base où les nœuds capteurs détectent des modifications dans le chemin qui mène aux voisinage à un saut de la station de base. En outre, la mise à jour du voisinage est utilisé pour empêcher un échec de routage. Deux modèles de mobilité ont été conçus pour gérer le mouvement de la station de base : la mobilité imprévisible (ILSR-UM) et prévisible (ILSR-CM). L'idée clé des deux protocoles est de permettre à chaque nœud capteur de maintenir un routage à variation lente lors du prochain saut vers la station de base, plutôt que la connaissance précise de la position de la station de base à variation rapide.

Discussion : ILSR garantit la livraison des données à la station de base mobile via les deux types de messages de mise à jour de localisation. Toutefois, cette approche n'est pas adaptée pour les applications non tolérantes au délais en raison du temps qu'il met pour l'ajustement de la route quand la station de base change d'emplacement.

ER (Elastic Routing)

Les auteurs dans [42] proposent une technique de routage géographique appelée ER (*Elastic Routing*). ER vise à réduire les messages de contrôle, la latence et la consommation d'énergie dans le réseau avec une ou plusieurs stations de base mobiles. ER suppose que tous les nœuds connaissent leurs positions ainsi que la position de

leurs voisins. En outre, il suppose l'existence de canaux bidirectionnels entre deux nœuds voisins. Initialement, le nœud source détermine la position de la station de base avec un système de localisation. Pour le transfert de données, un nœud source cherche un chemin valide vers la station de base dans sa liste de voisinage, une approche de retransmission par grille introduite dans [43] est adoptée pour la détermination du chemin vers la station de base. Toutefois, avant que les données transmises n'atteignent la station de base, cette dernière pourrait changer de position. Pour faire face à cette situation, ER propose d'utiliser les messages *beacons* périodiques ce qui permet d'avoir des informations continues sur les nouveaux voisins de la station de base. En retraçant la mobilité de la station de base, ER assure donc la livraison de données à la station de base mobile. Pour une diffusion supplémentaire de la dernière position de la station de base dans le réseau, ER utilise le sur-écoute (*overhearing*) des nœuds capteurs sans fil. Chaque fois qu'un nœud communique directement avec la station de base, il est entendu par d'autres nœuds voisins. Ce processus de sur-écoute se poursuit étape par étape lors de la transmission de données jusqu'à ce que le nœud source découvre la dernière position de la station de base mobile.

Discussion : Les résultats de simulation ont montré que ER garantit la livraison de données à la station de base mobile. En revanche, le temps de diffusion est assez long ce qui implique une latence importante. En outre, il intègre les informations relatives à la dernière position de la station de base dans chaque paquet de données et exploite le mécanisme de sur-écoute pour diffuser les informations de localisation de la station de base les plus récentes, ce qui n'assure pas une optimisation de l'énergie.

VGDD (Virtual Grid-based Data Dissemination)

Dans [44], les auteurs proposent une solution appelée dissémination de données basé sur une grille virtuelle VGDD (*Virtual Grid-based Data Dissemination*) pour la collecte périodique de données dans un réseau de capteurs sans fil. Ce travail est l'extension d'une approche appelée Virtual Grid-based Ajustement des routes dynamiques (VG-DRA) présenté dans [65]. Initialement, VGDD partitionne le réseau de capteurs en cellules de taille égale. Le nombre total de cellules est déterminé en fonction du nombre de nœuds capteurs. Dans chaque cellule un chef de cellule est choisi en se basant sur l'énergie des nœuds. Après la construction de la structure virtuelle, la station de base mobile contourne le réseau de capteurs et maintient une communication sans fil avec les nœuds tout au long de sa trajectoire pour la collecte de données comme illustré

dans la Figure 3.4. Pour faire face à la variation de vitesse de la station de base, VGDD utilise des nœuds appropriés pour la livraison de données ce qui diminue la perte de paquets.

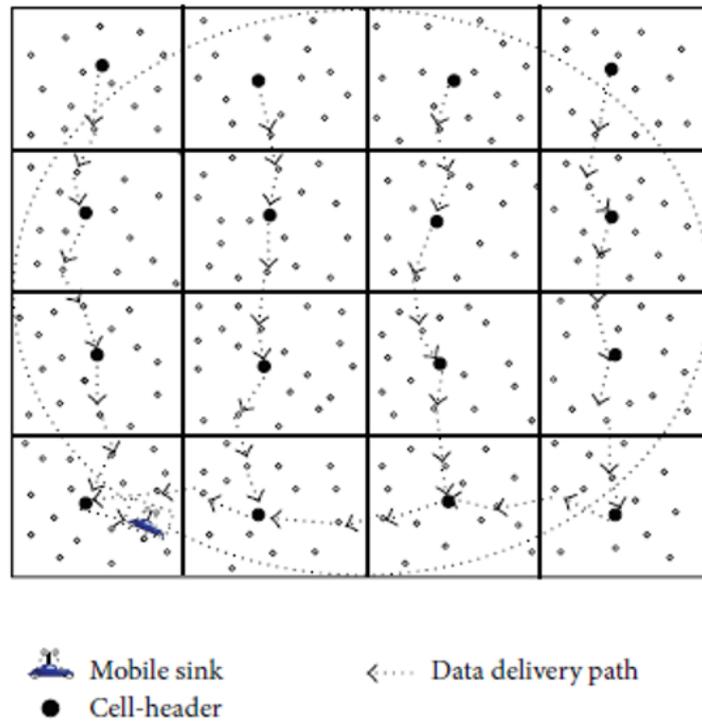


FIGURE 3.4 – Exemple d’infrastructure virtuelle après la configuration initiale des itinéraires [44].

Discussion : VGDD vise à assurer un meilleur taux de livraison de données en minimisant au maximum la perte de paquets. Le nombre de cellules est déterminé en fonction du nombre de nœuds, ce qui rend VGDD non évolutif et non adapté aux réseaux avec des post-déploiements.

3.2.3 Approches qui visent à minimiser la latence de la livraison de données

GMRE (Greedy Maximum Residual Energy)

Dans [45], les auteurs proposent GMRE Greedy Maximum Residual Energy une approche de collecte de données avec une station de base mobile qui vise à réduire la latence dans le réseau et optimiser la consommation d'énergie dû au réajustement des chemins qui mène à la station de base mobile. Pour cela GMRE utilise un modèle de mobilité contrôlé où la station de base favorise dans son déplacement les sites riches en énergie et en cohérence avec le coût de réajustement des routes vers ce site. Ainsi, un intervalle de pause minimum est imposé à chaque site afin de contrôler le taux de mobilité de la station de base. Par conséquent, si le site est une zone à énergie relativement haute que le site actuel et le coût de contrôle est non significatif, la station de base se déplacera vers ce nouveau site, sinon elle garde sa position. Pour connaître l'énergie résiduelle des nœuds dans des sites adjacents, la station de base sélectionne un nœud qui sera responsable de la collecte de l'énergie résiduelle des nœuds dans son site. A la demande de la station de base le nœud envoie les informations collectées.

Discussion : L'approche contrôlée de mobilité utilisé par GMRE permet une consommation d'énergie équilibrée sur tout le réseau et donc elle améliore la durée de vie. En revanche, la récupération des énergies résiduelles des sites est une opération coûteuse impliquant de nombreux nœuds qui doivent signaler leur niveau d'énergie à chaque demande. En outre les zones pauvres en énergie seraient toujours négligées ce qui peut causer une latence pour la livraison des données à la station de base mobile.

Biased sink mobility with adaptive stop times for low latency data collection in sensor networks

Dans [46], les auteurs montrent que l'utilisation d'une station de base mobile pour la collecte de données pour un réseau de capteurs sans fil réduit considérablement la consommation d'énergie en revanche elle cause l'augmentation des délais de livraison. Pour améliorer les compromis entre la latence et la consommation de l'énergie, les auteurs proposent une méthode de mobilité de la station de base qui s'adapte aux conditions du réseau, telles que la densité, l'énergie restante et le nombre de visites

passées dans chaque région du réseau. Il est basé sur l'idée qu'en raison de la mobilité de la station de base, certains nœuds ne peuvent pas accomplir la transmission de leurs données à la station de base et donc ils doivent attendre le prochain déplacement de la station de base. Cela entraîne une latence de livraison de données élevée et des pertes de données. Ce problème s'aggrave si la densité des nœuds dans une zone est élevée ou si les nœuds possèdent une quantité importante de données enregistrées. Pour résoudre le problème de court séjour de la station de base mobile dans une zone avec une forte densité, les auteurs introduisent une adaptation du temps de pause proportionnel au trafic de données. Pour cela, il faut avoir une connaissance globale sur les ressources du réseau, telles que les réserves initiales du réseau en énergie, et donc des informations sur la durée de vie prévue du réseau. De plus, les auteurs supposent que, selon l'application, certaines zones sont plus denses que d'autres. Par conséquent, lors de la mobilité de la station de base, elle fait des pauses relativement grandes dans les régions à forte densité de nœuds. Pour prendre en charge différents scénarios d'application, ils utilisent à la fois des types de mobilité déterministes et aléatoires pour le parcours du réseau. Dans la mobilité déterministe, la station de base traverse chaque cellule, couvrant ainsi toute la zone du réseau. Dans certains scénarios, où la topologie du réseau n'est pas connue par la station de base, un modèle de mobilité aléatoire est adopté. En outre, pour assurer une couverture équitable des différentes zones du réseau, la mobilité aléatoire de la station de base est adaptée à la fin de chaque période de pause en privilégiant les zones moins visitées afin de couvrir la zone du réseau plus rapidement.

Discussion : En introduisant le mécanisme de temps de pause adaptatif, l'approche proposée dans [46] permet de réduire considérablement le temps de latence. Bien que ce mécanisme de temps de pause adaptatif soit bénéfique pour la région du réseau où la station de base effectue sa pause, il peut entraîner une latence importante dans la transmission des données à partir d'autres régions du réseau en raison du temps de pause plus long de la station de base.

MESS (Multiple Enhanced-deployed Sub-Sinks)

Dans [47], les auteurs présentent une approche de collecte de données appelée MESS (*Multiple Enhanced Specified-plied Subsinks*) avec une station de base mobile qui suit un chemin limité. MESS emploie plusieurs nœuds spécifiques (*Sub-Sink*) pour la collecte des données provenant des nœuds les plus éloignés. L'objectif est de réduire le délai et la distance de transmission entre les nœuds source et la station de base mobile. Les

nœuds spécifiques sont considérés comme des nœuds sans fil améliorés ayant plus de ressources en terme de capacité de stockage. Une fois les capteurs déployés, les nœuds spécifiques sont déployés tout au long du chemin de la station de base. De cette façon, l'emplacement des nœuds spécifiques crée une bande dans le champ de détection et fournit un ensemble de points de rendez-vous avec la station de base mobile comme le montre la Figure 3.5.

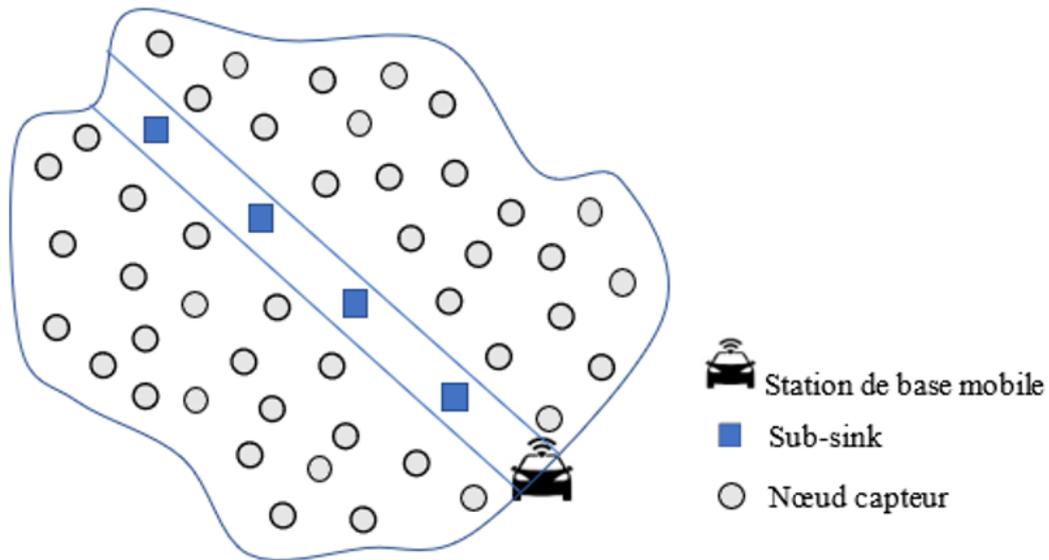


FIGURE 3.5 – Structure à base de bande dans MESS [47].

Chaque nœud spécifique est considéré comme un point d'accès à la station de base mobile. Il informe la zone du réseau où il se trouve des services qu'il offre. A cet effet, chaque nœud spécifique envoie un message de diffusion (contenant son ID) de sorte que tous ses voisins à un saut placeraient le nœud spécifique comme le saut suivant. Si un nœud reçoit des messages de plus d'un nœud spécifique, il choisit son prochain-saut à la station de base selon la puissance du signal reçu. Par conséquent, les voisins à un saut des nœuds spécifiques diffuseraient cette alerte de route plus loin dans le réseau jusqu'à ce que tous les nœuds capteurs soient informés. Dans la phase de collecte de données, MESS suppose que la vitesse de la station de base mobile est assez lente pour recueillir toutes les données récoltées par au moins deux nœuds spécifiques le long de son chemin tout en se déplaçant continuellement.

Discussion : MESS améliore les performances du réseau à petit échelle. Cependant, dans des réseaux à grande échelle, chaque nœud spécifique pourrait collecter les

données d'un grand nombre de nœuds capteurs et, par conséquent, la transmission de ses données à la station de base ne peut pas être réalisée en une seule tournée. En conséquence, une grande latence serait causée dans la livraison des données à la station de base. Une autre contrainte est l'utilisation de nœuds spécifiques, qui non seulement ont besoin d'être riches en capacité de stockage, mais aussi en énergie. Ces contraintes ainsi que la vitesse fixe de la station de base mobile limite l'utilisation de MESS à seulement certaines applications environnementales. De même, les nœuds dans le voisinage des nœuds spécifiques vont subir un épuisement d'énergie rapide réduisant ainsi la durée de vie du réseau.

3.3 Étude comparative

Nous présentons dans cette section un tableau comparatif des solutions discutées précédemment. La comparaison concerne les points suivants :

- Type de nœuds capteurs utilisés : homogène ou hétérogène.
- Nombre de stations de base mobiles utilisées dans le réseaux.
- Modèle de la mobilité de la ou les stations de base.
- Taille du réseau : petite (le nombre de nœuds ne dépasse pas 100), moyenne (le nombre de nœuds est entre 100 et 500) et grande (le nombre de nœuds dépasse 500).
- La topologie du réseau : plate, arbre, grille, ou topologie en clusters.

Le nombre de stations de base utilisées dans le réseau peut améliorer la collecte de données. Certains approches utilisent plusieurs stations de base mobiles fonctionnant simultanément dans différentes zones du réseau, ce qui permet de réduire les communications à multi-sauts et conserver l'énergie. L'utilisation de plusieurs stations de base mobiles permet d'optimiser la consommation d'énergie et diminue la latence de la transmission des données. En revanche, l'utilisation de plusieurs stations de base mobiles augmente non seulement les coûts matériels et d'exploitation, mais nécessite également une collaboration étroite entre elles afin d'éviter une couverture redondante des zones du réseau. Un autre point est que si plusieurs stations de base fonctionnent indépendamment dans le réseau, cela entraînera davantage de congestion du trafic, ce qui augmentera le taux de perte de paquets et le temps de latence de livraison des données [41].

Le modèle de mobilité que la station de base suit affecte considérablement le processus de collecte de données. Comme mentionné précédemment, la mobilité de la station

Approche	Station de base	Type de nœuds	Taille du réseau	Topologie	Modèle de mobilité
MSRP [34]	Une seule	Homogène	Moyenne	Cluster	Contrôlé
MobiRoute [35]	Une seule	Homogène	Petite	Plate	Contrôlé
SEAD [36]	Multiple	Homogène	Moyenne	Arbre	Aléatoire
DDRP [37]	Multiple	Homogène	Moyenne	Plate	Aléatoire
TTDD [38]	Multiple	Homogène	Grande	Grille	Aléatoire
ILSR [40]	Une seule	Homogène	Moyenne	Plate	Aléatoire
ER [42]	Multiple	Homogène	Grande	Plate	Aléatoire
GMRE [45]	Une seule	Homogène	Moyenne	Non spécifié	Contrôlé
[46]	Une seule	Homogène	Moyenne	Plate	Contrôlé
MESS [47]	Une seule	Hétérogène	Petite	Plate	Prédéfini
PADD [39]	Multiple	Homogène	Moyenne	Grille	Aléatoire
VGDD [44]	Une seul	Homogène	Moyenne	Grille	Contrôlé

TABLE 3.1 – Comparaison des approches étudiées.

de base peut être aléatoire [36, 37, 38, 40, 42], prédéfinie (déterministe) [47] et/ou contrôlée [34, 35, 44, 45, 46]. Le modèle de mobilité des stations de base est imposé par l'environnement d'application (hostilité, terrain), la densité des nœuds et les espèces (animaux, humains, robots) auxquelles le dispositif de la station de base est attaché.

La taille du réseau est considérée comme le nombre total de nœuds du réseau. Il dépend fortement des applications et a un impact direct sur les performances de la livraison des données. Par commodité, nous considérons ici que la taille du réseau est petite (jusqu'à 100 nœuds), moyenne (100 à 500 nœuds) ou grande (plus de 500 nœuds). Dans les applications où la taille du réseau est petite, la mobilité contrôlée de la station de base permet une plus grande optimisation de la consommation de l'énergie [47].

La mobilité de la station de base peut être appliquée à diverses topologies des réseaux de capteurs sans fil. Dans les approches étudiées, nous avons constaté que les topologies qui ont été utilisées avec une station de base mobile sont : plate, arbre, cluster et grille.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la majorité des approches de collecte de données utilisant des stations de base mobiles. En se basant sur leurs objectifs, ces approches ont été classées en trois catégories. Chaque proposition présente des avantages mais pose des problèmes particuliers. En termes d'objectifs, un compromis doit être réalisé entre les délais de transmissions et la consommation de l'énergie. En effet, une bonne solution doit respecter les conditions réelles des environnements de capture, combiner plusieurs modes de diffusion de données et imposer moins de contraintes matérielles et logicielles.

Chapitre 4

Nouvelle approche de collecte de données basée sur la mobilité de la station de base dans les RCSFs

Dans ce chapitre, nous présentons notre première contribution qui consiste en une nouvelle approche de collecte de données dans les RCSFs avec une station de base mobile. Dans notre solution, le réseau est organisé en grille avant le déploiement des nœuds ce qui évite un échange de messages après le déploiement pour la construction de la grille. Ensuite, nous proposons un algorithme de gestion de mobilité de la station de base. Les positions de la station de base dépendent de l'énergie des nœuds capteurs et de la distance entre la station de base et les nœuds capteurs en charge d'envoyer les données dans chaque cellule de la grille. L'objectif de notre approche consiste à adapter de manière optimale la position de la station de base dans le but de préserver l'énergie des nœuds. Nous effectuons une comparaison de notre solution avec d'autres approches étudiées dans le chapitre précédent.

4.1 Introduction

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, la mobilité de la station de base est l'une des solutions les plus adaptées afin de prolonger la durée de vie du réseau et de minimiser la perte de données. Dans ce chapitre nous allons présenter une nouvelle approche de collecte de données basée sur cette solution. Le chapitre est organisé en deux parties, la première est une description de l'approche proposée avec différents types de mobilité de la station de base, la deuxième fait l'objet d'une analyse des différents résultats de simulation et de comparaison avec d'autres solutions.

Pour simplifier la collecte de données dans un réseau de capteurs sans fil, en particulier lorsque la zone du réseau est vaste, la solution principale consiste à construire une grille (voir la Figure 4.1) dans laquelle chaque cellule est surveillée par le chef de la cellule (*Cell-Head (CH)*) qui collecte les données à partir des nœuds capteurs de sa cellule. Plusieurs approches de collecte de données basées sur les grilles dans un réseau avec une ou plusieurs stations de base mobiles ont été proposées pour la conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil (Singh et al., 2014 ; Majma et al., 2012 ; Wang et Chiang, 2011 ; Majma et al., 2014, 2015 ; Khan et al., 2015a). Cependant, ces approches comportent une phase de construction de la grille gourmande en temps de communication et ne sont pas évolutifs lorsque la station de base doit se déplacer vers chaque cellule de la grille. Ceci nous a motivé pour proposer une approche qui permet d'assurer un bon équilibre entre l'efficacité énergétique et une transmission de données fiable.

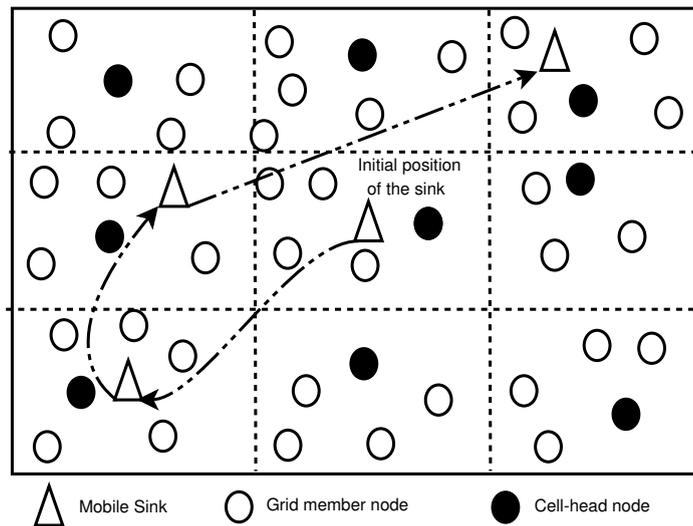


FIGURE 4.1 – Un RCSF décomposé en grille avec une station de base mobile.

Dans notre travail et contrairement aux solutions existantes basées sur une topologie de grille avec une ou plusieurs stations de base mobiles, la surface du réseau est organisée en grille de cellules avant le déploiement de nœuds capteurs. Il n'est pas nécessaire d'échanger des messages pour construire la grille comme dans EEGDD (Singh et al., 2014) et PADD (Wang et Chiang, 2011). Ce qui permettra de prolonger la durée de vie du réseau. De plus, nous proposons un algorithme basé sur la mobilité de la station de base qui préserve davantage l'énergie des nœuds en optimisant la distance entre les emplacements de la station de base mobile (MS) et chaque chef de cellule (CH). La proposition prend en compte deux paramètres :

- L'énergie résiduelle des chefs de cellule (CHs)
- La distance de transmission entre les CHs et la station de base.

L'algorithme calcule les meilleures positions de la station de base en se basant sur l'énergie des CHs et leurs distances de la station de base. A notre connaissance, aucune des solutions de la littérature n'a proposé de méthode de construction de grille avant le déploiement de nœuds avec un algorithme de mobilité de la station de base adaptative qui utilise les deux paramètres cités précédemment.

4.2 EASY (Energy Aware Sink mobilitY)

Nous introduisons dans cette section, une nouvelle approche de collecte de données, appelée EASY (Energy Aware Sink mobilitY).

4.2.1 Hypothèses

La conception de EASY (Energy Aware Sink mobilitY) se base sur les hypothèses suivantes :

- Les capteurs sont déployés sur une zone d'intérêt de manière aléatoire,
- Les nœuds capteurs sont homogènes : les nœuds capteurs sont similaires dans leur capacité de traitement, de communication, d'énergie et de stockage,
- Les CHs peuvent atteindre la station de base par une communication en un seul saut.
- La station de base est mobile. Elle peut se déplacer dans le réseau afin de se positionner à l'endroit prévu pour la collection des données agrégées par les CHs. Elle n'a pas de contraintes sur les capacités de calcul, de stockage et de

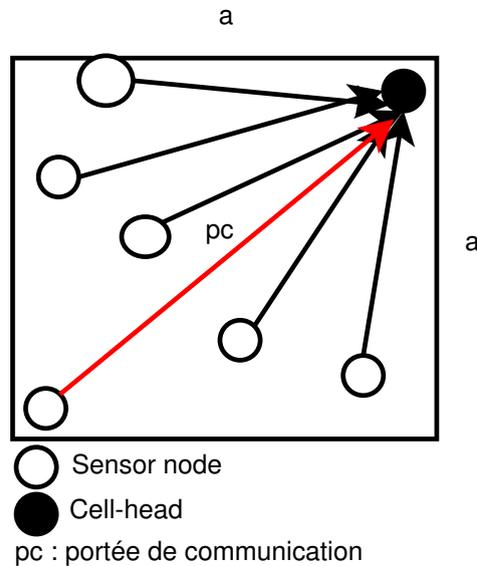


FIGURE 4.2 – La taille d’une cellule.

traitement.

- Les capteurs sont stationnaires après le déploiement et sont capable de déterminer leurs positions.
- Les canaux de communications sont bidirectionnels, si un nœud u peut recevoir un message du nœud v alors u peut envoyer un message à v .
- Chaque nœud capteur possède un identifiant unique.

4.2.2 Construction de la grille

Dans cette phase, nous nous intéressons à la construction de la grille où les nœuds capteurs sont dispersés de manière aléatoire dans la zone d’intérêt, ils sont homogènes et possèdent les mêmes capacités matérielles. Le réseau est partitionné en cellules virtuelles. A partir de la portée de communication d’un nœud capteur pc , nous allons calculer la taille optimale d’une cellule ce qui nous permet par la suite de partitionner la surface du réseau selon cette taille. En effet, comme indiqué sur la Figure 4.2, le cas le plus difficile en terme de communication entre un nœud capteur et son chef de cellule se produit lorsque ces deux nœuds se trouve éloignés de la valeur pc : la portée de communication des capteurs. Nous nous basons donc sur ce cas limite pour construire la grille comme suit :

$$pc^2 = a^2 + a^2 \Rightarrow pc = a\sqrt{2} \Rightarrow a = \frac{pc}{\sqrt{2}}$$

Où a est le côté de la cellule.

Les Figures 4.3, 4.4 et 4.5 donnent des exemples de construction de grille pour différentes portées de communication d'un nœud capteur où la surface du réseau est 100 x 100 m. Nous utilisons Matlab R2008b pour tracer les figures du réseau.

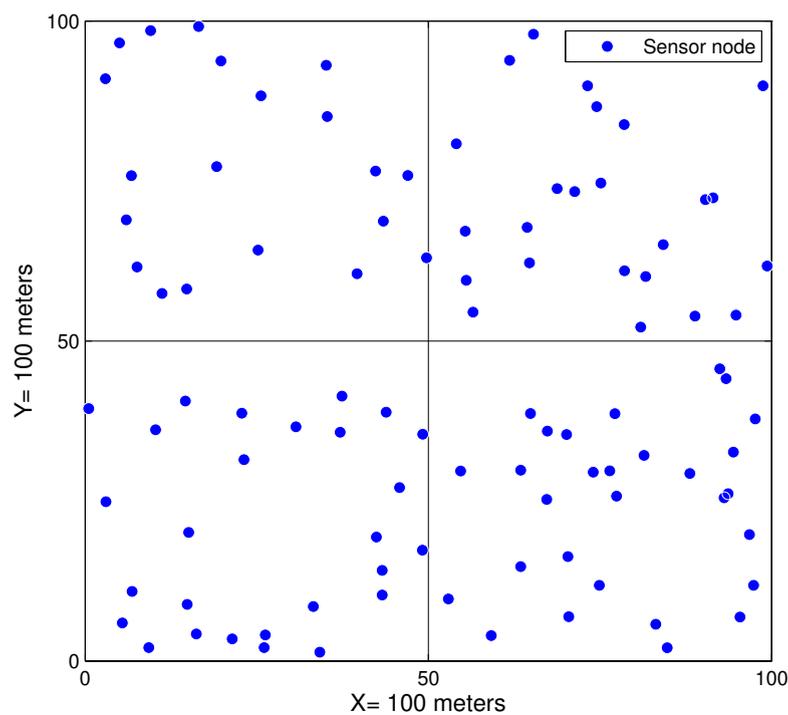


FIGURE 4.3 – Grille 2×2 avec une cellule 50×50 mètres² et une portée de communication de 70.71 mètres.

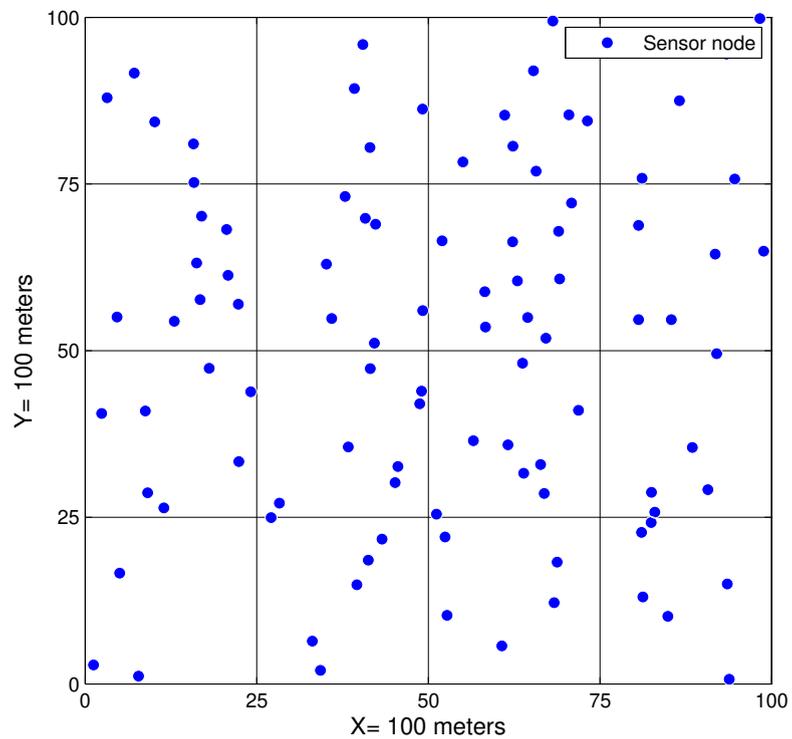


FIGURE 4.4 – Grille 4×4 avec une cellule 25×25 mètres² et une portée de communication de 35.35 mètres.

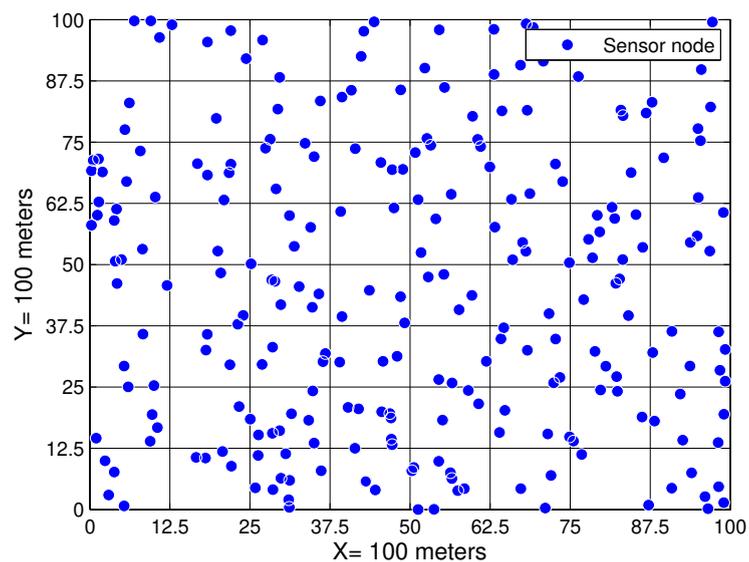


FIGURE 4.5 – Grille 8×8 avec une cellule 12.5×12.5 mètres² et une portée de communication de 17.6 mètres.

Après la construction de la grille, le temps est divisé en tours (*rounds*) comme illustré dans la Figure 4.6. Dans chaque tour, on a une période de sélection du chef de cellule CH et une période de collecte de données par les CHs suivie d'une transmission des données à la station de base mobile.

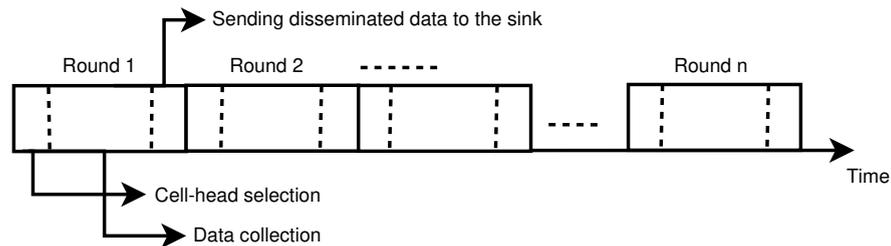


FIGURE 4.6 – Description d'un tour (*round*).

4.2.3 Sélection des CHs et organisation des cellules

Avant le déploiement des nœuds, chaque nœud connaît sa position (à l'aide d'une technique de localisation telle qu'un système de positionnement global GPS) et le nombre de cellules dans la zone d'intérêt. Ainsi, chaque nœud capteur détermine la cellule à laquelle il appartient et reste statique après son déploiement. Chaque cellule possède un chef de cellule (CH *cell-head*) et des nœuds membres. Le CH est responsable de la collecte et de la transmission des données captées par ses nœuds membres à la station de base. Vu que la taille de la cellule est calculée selon la portée des nœuds, quelle que soit la position du CH, ce dernier peut communiquer avec n'importe quel membre de sa cellule (Figure 4.2).

Pour déterminer le CH dans chaque cellule, nous prenons en compte l'énergie résiduelle des nœuds. Pour le premier tour, la sélection du CH est basée sur la position des nœuds capteurs dans la cellule. Au début, tous les nœuds ont la même énergie initiale et chaque nœud est au courant de sa position. Chaque nœud diffuse un message contenant son identité et sa position dans la cellule, ce qui lui permet de décider s'il s'agit du CH du premier tour en comparant sa position avec les autres positions reçues. Le nœud le plus proche du centre de la cellule est élu comme CH.

Pour les tours suivants, les nœuds commencent à perdre leurs énergies selon leurs consommations. Au début de chaque tour, chaque nœud capteur diffuse un message contenant son identité et son niveau d'énergie résiduelle. Ensuite, chaque nœud compare

les différentes valeurs d'énergie reçues. Le nœud capteur avec l'énergie résiduelle la plus élevée est sélectionné comme étant CH du tour en cours. Le diagramme suivant illustre les étapes de sélection des chefs de cellule.

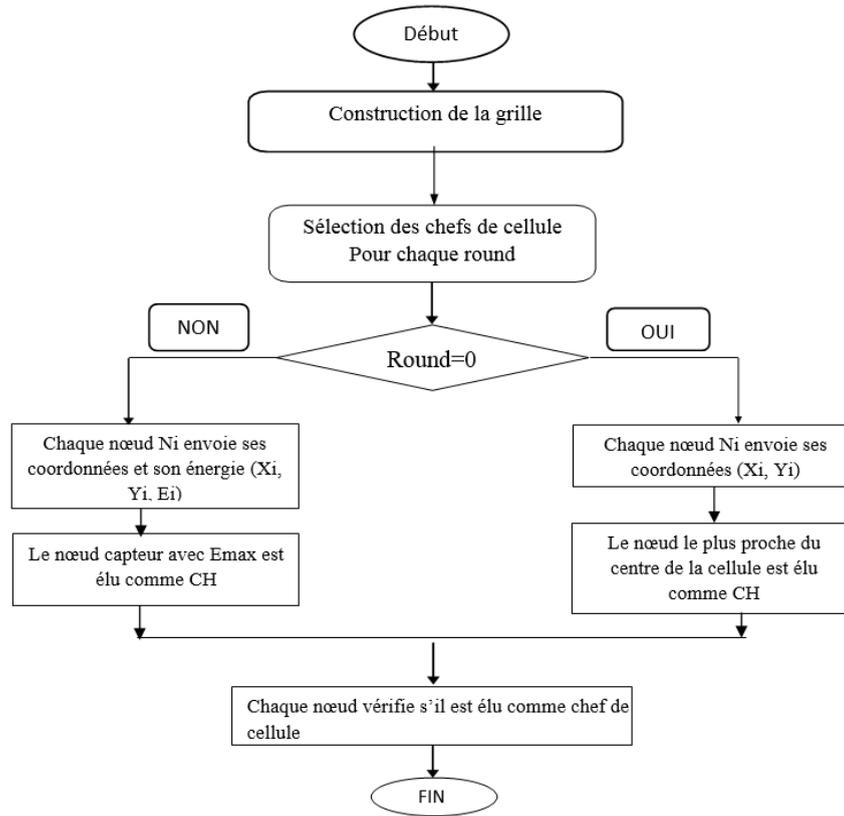


FIGURE 4.7 – Le choix de chef de cellule.

Le nœud élu comme CH doit informer les autres nœuds. Pour cela, il envoie un message d'avertissement ADV contenant son identité, cette diffusion permet de s'assurer que tous les nœuds ont reçu le message. Chaque nœud, ayant reçu un ou plusieurs ADV, choisit le CH de la cellule à laquelle il appartient.

4.2.4 Transmission des données

Après la sélection des CHs, chaque CH agit comme un centre de commande local pour coordonner les transmissions des données au sein de sa cellule. Pour cela il utilise la technique TDMA (Figure 4.9), il assigne à chaque nœud membre un intervalle de temps (slot) durant lequel il peut transmettre les données captées. L'ensemble des slots

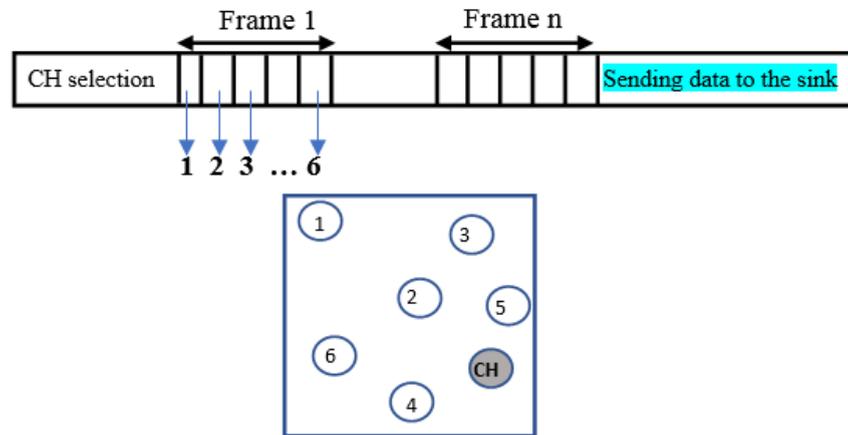


FIGURE 4.8 – La technique TDMA utilisée par les CHs.

assignés aux nœuds d'une cellule est appelé *frame*. La durée de chaque frame diffère selon le nombre de nœuds appartenant à une cellule. En outre, pour minimiser les interférences entre les transmissions dans des cellules adjacentes, chaque CH sélectionne de manière aléatoire un code d'une liste de codes de propagation CDMA (Code Division Multiple Access), il le transmet par la suite à ses membres afin de l'utiliser pour leurs transmissions.

4.2.5 Mobilité de la station de base

Une fois la grille construite et les CHs élus, la station de base dans son déplacement suit un modèle de mobilité optimisé pour la collecte de données qui préserve davantage l'énergie des nœuds en optimisant la distance entre la position de la station de base mobile et les CHs choisis. La proposition prend en compte deux paramètres : l'énergie résiduelle des CHs et le point centroïde entre les différents CHs.

Après la sélection des CHs, ces derniers doivent communiquer leur identité, leur position (x_i, y_i) et leur énergie E_{CH_i} à la station de base pour le tour en cours. Dès la réception de ces informations, la station de base compare les différentes énergies des CH_i et elle récupère la position du CH ayant l'énergie minimale E_{min} . Si la station de base se rapproche du CH ayant la plus basse énergie, elle va faire en sorte de conserver son énergie pour lui permettre de durer plus longtemps. En effet, l'énergie consommée par un nœud dépend fortement de la distance entre ce nœud et la station de base. Cependant, lorsque la station de base visite la cellule contenant le CH dont l'énergie

est la plus basse (minimale), les autres CHs doivent atteindre la station de base par des transmissions longues distances, ce qui implique une forte consommation d'énergie et probablement une perte de paquets. En conséquence, et pour réduire la perte de paquets la station de base calcule le point centroïde (HP *Head-Point*) entre les CHs par les formules suivantes :

$$x_{HP} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (4.1)$$

$$y_{HP} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad (4.2)$$

Où x_i and y_i représentent la position de CH_i . n est le nombre des cellules.

La station de base se déplace au milieu entre la position du CH avec la plus basse énergie et la position calculée HP. Ainsi, la station de base se place près de la cellule ayant le CH avec la plus basse énergie et à une distance égale des autres CHs. Les deux algorithmes suivants présentent le pseudo code de notre approche.

Algorithme 1 First step of the mobile sink

```

Get( $x_1, y_1, e_1$ ); /* get the position and the energy of the first cell */
 $id_{CH} = 1$ ; /* Initial identifier value of the CH with the lowest energy */
 $e_{min} = e_1$ ;
for  $i = 2$  to  $n$  /*  $n$  is the number of cells */ do
    Get( $x_i, y_i, e_i$ )
    if  $e_i < e_{min}$  then
         $e_{min} = e_i$ ;
         $id_{CH} = i$ ;
    end if
end for
Lowest energy CH identifier  $id_{CH_L} = id_{CH}$ ;

```

Algorithme 2 Second step : Sink mobility

```

 $x_{sink} = 0, y_{sink} = 0;$ 
 $x_{HP} = 0, y_{HP} = 0;$ 
for  $i=1$  to  $n$  /*  $n$  is the number of cells */ do
    Get( $x_{CH_i}, y_{CH_i}, e_{CH_i}$ );
     $x_{HP} = x_{HP} + \frac{x_{CH_i}}{n};$ 
     $y_{HP} = y_{HP} + \frac{y_{CH_i}}{n};$ 
end for
 $x_{sink} = \frac{x_{HP} + x_{id_{CH_L}}}{2};$ 
 $y_{sink} = \frac{y_{HP} + y_{id_{CH_L}}}{2};$ 
    Moves to the point  $(x_{sink}, y_{sink});$ 
    The sink informs the CHs of its position;

```

4.3 Évaluation des performances

4.3.1 Modèle d'énergie

Dans un réseau de capteurs, l'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations de captage d'information, de traitement et de communication de données. Plusieurs modèles de consommation énergétique ont été proposés afin d'étudier et dévaluer les différents types de dissipation d'énergie dans ces réseaux. Vu la part importante de dissipation énergétique liée à la communication dans les RCSFs, la plupart des modèles de consommation énergétique se focalisent plus sur l'évaluation de l'énergie liée à la communication. Ainsi, ces modèles prennent rarement en compte les autres formes de dissipations énergétiques qui sont généralement négligeables par rapport aux énergies nécessaires à la communication. L'énergie dissipée par la communication est divisée en deux parties : l'énergie de transmission (TX) et l'énergie de réception (RX). L'énergie de transmission d'un nœud capteur est l'énergie dépensée lors de la transmission des données, et l'énergie de réception d'un nœud capteur est l'énergie dépensée par ce nœud lors de la réception de données envoyées par un autre nœud. Parmi les modèles de consommation énergétique proposés dans la littérature, nous allons présenter et adopter celui qui a été proposé dans [2] par Heinzelman et al. Il s'agit d'un modèle simple de consommation énergétique qui ne tient en compte que de l'énergie de transmission et de réception. Ainsi, selon ce modèle, pour transmettre un message de longueur k bits entre un émetteur et un récepteur à une distance d

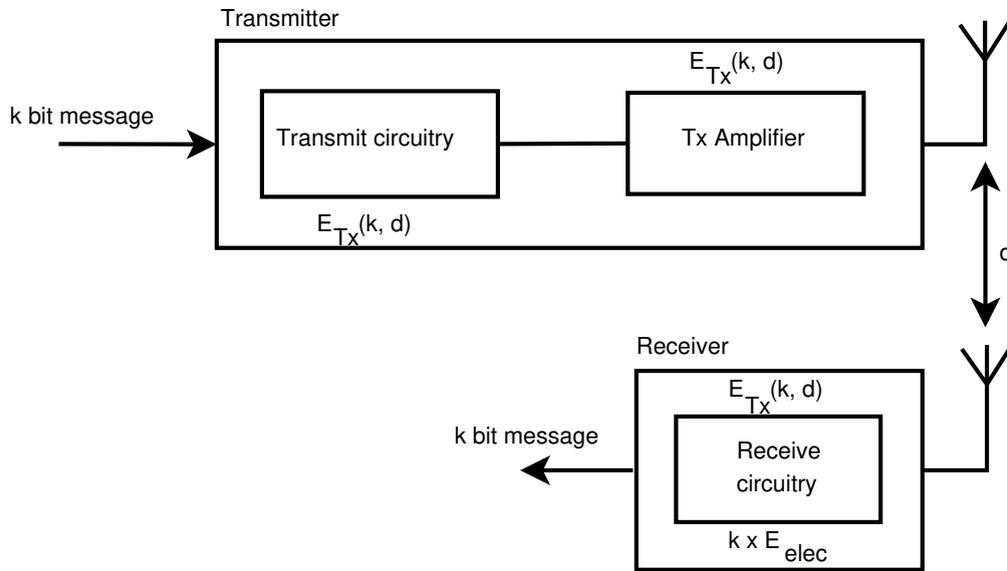


FIGURE 4.9 – Modèle d'énergie [2, 39].

(en mètre), le module radio de l'émetteur dépense la quantité énergétique (en Joules) donnée par l'équation suivante :

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \times k + E_{amp} \times k \times d^2 \quad (4.3)$$

Pour recevoir ce message, le module radio du récepteur dépense la quantité énergétique (en Joules) donnée par l'équation suivante :

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \times k \quad (4.4)$$

Dans ces deux équations, E_{Tx} et E_{Rx} représentent respectivement l'énergie électrique de l'émetteur et celui du récepteur. La Figure 4.9 illustre ce modèle de consommation énergétique [2, 39].

4.3.2 Résultats de simulation

Le paramètres de simulation sont présentés dans le Tableau 4.1.

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

Paramètre	Valeur
Surface du réseau	100 mètres x 100 mètres
Nombre de nœuds	100
Portée de communication	47 mètres
Position initiale de la station de base	(50, 175)
Énergie initiale d'un nœud	2 Joule
Durée d'un tour	20 seconds
Taille d'un paquet	500 <i>bytes</i>
E_{elec}	50nJ/bit
E_{amp}	100pJ/bit/m ₂

4.3.2.1 Durée de vie du réseau

La Figure 4.10 représente le nombre de nœuds capteurs en vie dans le réseau. SS représente une collecte de données avec une station de base fixe dans sa location initiale. RSM représente une collecte de données où la station de base se déplace aléatoirement dans le réseaux. À partir de cette figure, nous constatons que, l'utilisation d'une station de base mobile prolonge considérablement la durée de vie des nœuds capteurs. EASY surpasse SS et RSM principalement parce qu'avec ces méthodes, les CHs doivent envoyer leurs paquets sur de longues distances lorsque la station de base est fixée à une position (pour la méthode SS) ou lorsque la station de base se déplace de manière aléatoire sans tenir compte de sa distance par rapport aux CHs (pour le RSM). Ceci épuise rapidement les énergies des CHs.

La communication étant l'opération la plus consommatrice de l'énergie pour les nœuds, la réduction du nombre de transmissions et de réceptions de messages a un impact sur la durée de vie du réseau. Dans EASY, la transmission est évitée autant que possible notamment dans la construction de grille. Pour cette raison, la durée de vie du réseau est prolongée. Le résultat de la Figure 4.11 confirme notre amélioration par rapport à PADD [39] et à VGDD [44]. Nous remarquons que l'utilisation d'une station de base mobile réduit considérablement l'énergie consommée dans le réseau. Bien que la mobilité aléatoire de la station de base améliore la consommation d'énergie

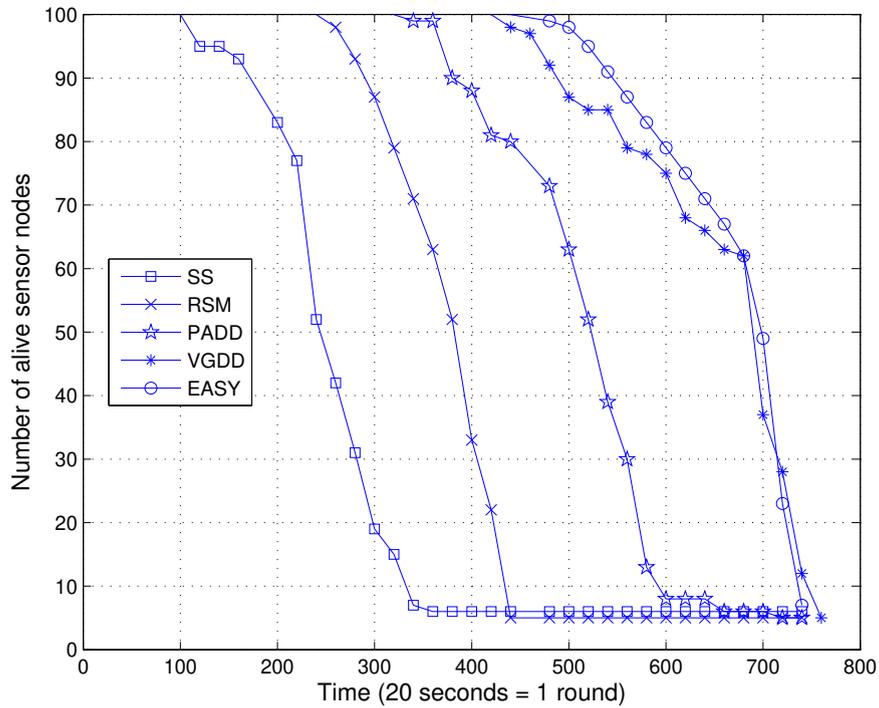


FIGURE 4.10 – Durée de vie du réseau.

par rapport à SS mais elle souffre du fait que les résultats varient d’une simulation à une autre. Cependant, l’approche EASY montre une amélioration stable et remarquable en terme de consommation d’énergie en la comparant avec les scénarios SS et RSM. PADD [39] et VGDD [40] ont presque la même consommation d’énergie totale comparé l’un à l’autre. PADD [39] consomme une quantité importante d’énergie pour la construction de la grille et VGDD [40] consomme de l’énergie lors de la collecte de données auprès des CHs en raison de la mobilité circulaire de la station de base.

4.3.2.2 Taux de livraison de données

La Figure 4.12 présente les résultats de la simulation considérant comme métrique le nombre de paquets reçus par la station de base. Cette métrique montre l’impact de la mobilité de la station de base sur les données collectées. Il ressort clairement de la Figure 4.12 que la collecte des données captées est meilleure lorsque la station de base est mobile. De plus, une position optimale de la station de base par rapport aux CHs conserve l’énergie de ces derniers et évite la perte de données.

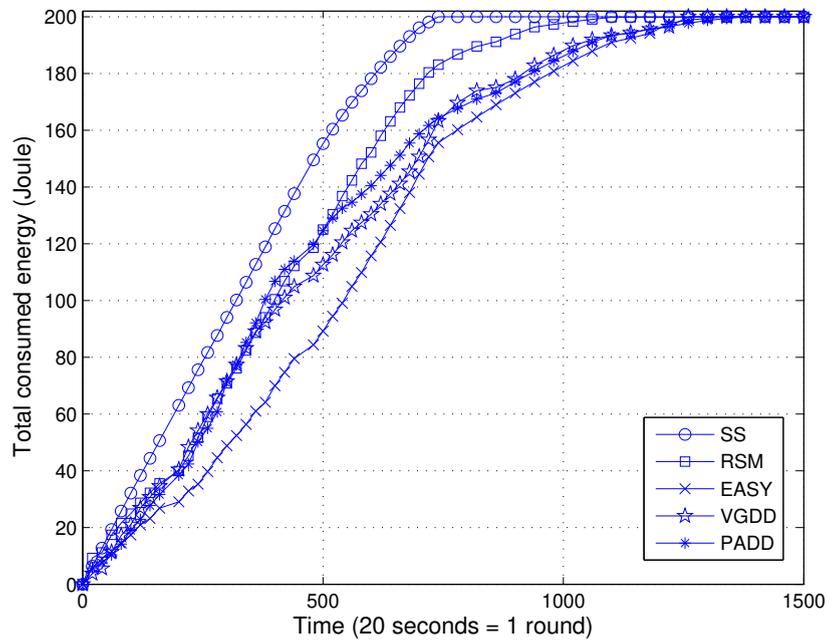


FIGURE 4.11 – Énergie consommée.

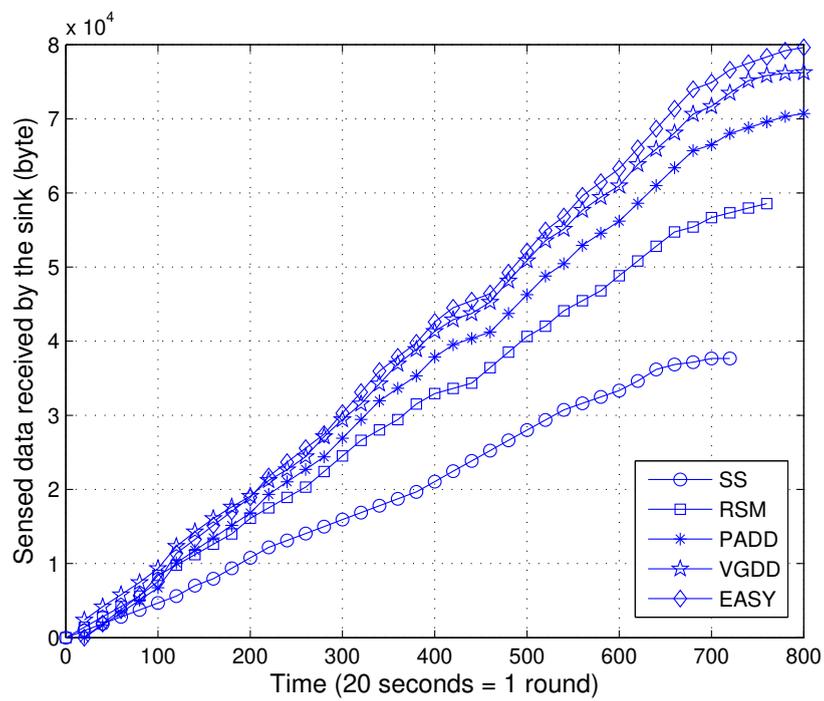


FIGURE 4.12 – Taux de données.

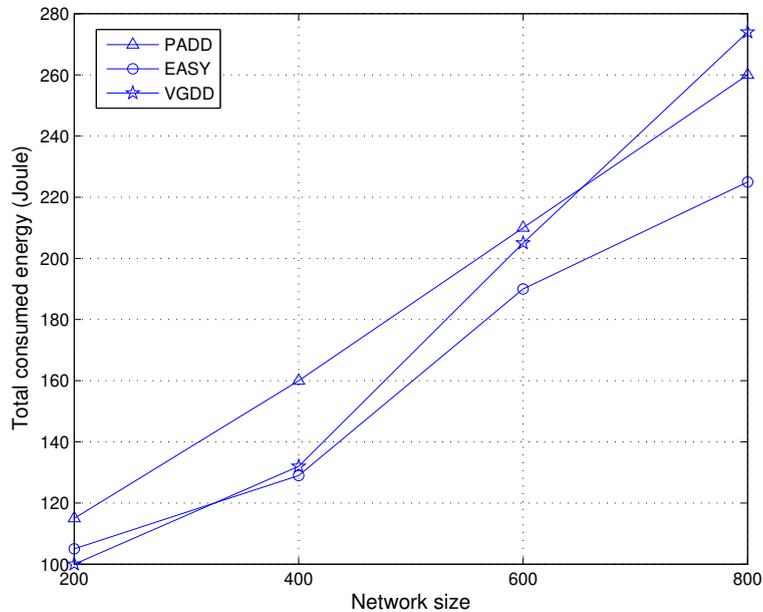


FIGURE 4.13 – Efficacité en terme d'énergie.

4.3.2.3 Passage à l'échelle

Dans certaines applications de réseau de capteurs, un déploiement massif de nœuds capteurs est nécessaire pour collecter des informations sur leur environnement. En conséquence, les solutions basées sur la mobilité de la station de base devraient être évolutives. Nous avons comparé notre proposition EASY avec PADD [39] et VGDD [40] en ce qui concerne la consommation d'énergie pour différentes tailles de réseau. Nous avons effectué des simulations en faisant varier le nombre de nœuds déployés entre 200 et 800 nœuds avec une station de base mobile. Rappelons que PADD utilise une station de base avec mobilité aléatoire, tandis que dans VGDD, la station de base mobile se déplace de manière circulaire. La Figure 4.13 montre la consommation totale d'énergie pour EASY, PADD et VGDD. Notre approche EASY présente une consommation d'énergie plus efficace. En effet, PADD nécessite un échange de messages pour la construction et la maintenance du réseau. Tandis que, dans notre approche, aucun message n'est nécessaire pour construire la grille. VGDD affiche une consommation d'énergie raisonnable lorsque le nombre de nœuds déployés est faible. Cependant, lorsque le nombre de nœuds déployés augmente, VGDD devient une solution énergivore. Ceci est justifié par l'impact du nombre de cellules qui dépend du nombre de nœuds déployés dans VGDD.

Pour EASY, la taille du réseau et la portée de communication des nœuds sont les deux métriques pouvant influencer sur ses performances. Dans le cas d'une grande zone de réseau avec une faible portée de communication pour les nœuds capteurs, EASY divise le réseau en un grand nombre de cellules de petite taille, ce qui peut affecter la transmission des données de certains CHs à la station de base mobile. Ce problème peut être résolu en utilisant une communication multi-sauts d'un CH à un autre afin d'acheminer les données à la station de base, ce mode d'envoi est appelé inter-cellule.

4.4 Conclusion

L'énergie étant une ressource précieuse dans les RCSFs, la collecte de données assistée par la mobilité de la station de base est une solution prometteuse pour maximiser la durée de vie du réseau et minimiser la perte de paquets. Cependant, cette solution nécessite une gestion efficace de la mobilité de la station de base. Dans ce chapitre, nous avons abordé la mobilité des stations de base en tant que solution pour améliorer la préservation de l'énergie et la collecte de données dans les RCSFs basés sur une topologie en grille. Nous avons proposé un algorithme simple de mobilité de la station de base qui offre plus de performance non seulement par rapport aux solutions basées sur des stations de base statiques mais également par rapport à des approches basées sur une station de base mobile. Nous travaillons actuellement sur l'exploration et l'adaptation de notre algorithme de mobilité de la station de base dans une application Internet des objets (IoT) où la mobilité peut être utilisée dans le but de conserver l'énergie des objets connectés. En outre, un algorithme de mobilité amélioré pourrait être conçu lors de la prise en charge de nœuds capteurs mobiles, comme dans un travail récent proposé dans [66] où les auteurs s'intéressent à l'intégration des capteurs dans le domaine médicale.

Chapitre 5

Mobilité et sécurité dans les RCSFs

Compte tenu des spécificités contraignantes des nœuds capteurs en terme de ressources, appliquer un lourd mécanisme de cryptographie asymétrique tel que RSA n'est pas réalisable. Cependant, un système cryptographique symétrique qui utilise peu de ressources peut être appliqué. La plupart des solutions de gestion de clés proposées se concentrent sur les RCSFs statiques et n'envisagent pas l'ajout de nouveaux nœuds capteurs et leur mobilité d'une part et ils ne fournissent pas de résilience suffisante à l'attaque de compromission de nœuds d'autre part. Dans ce chapitre, nous présentons une nouvelle méthode de pré-distribution de clés qui a la particularité d'assurer l'auto-guérison (*self-healing*) après une attaque de compromission de nœuds. Cela signifie que l'effet des nœuds compromis disparaît avec le temps. La comparaison de notre proposition par rapport à d'autres solutions de pré-distribution de clés montre son efficacité.

5.1 Introduction

Déployer des dispositifs tels que des capteurs est une technique inévitable dans les applications du monde réel qui collectent des données environnementales ainsi que dans des applications d'Internet des objets (IoT). Les capteurs sont autonomes et alimentés par des batteries, équipés des unités de détection adéquates qui dépendent de l'application (pour mesurer la température, la pression, l'humidité, etc.), d'une unité de traitement limitée en calcul et un espace mémoire restreint. Plusieurs applications intégrant des périphériques aux ressources limitées telles que les applications de santé, de surveillance d'usines ou de frontière nécessitent des communications sécurisées [55]. Cependant, les solutions de sécurité traditionnelles ne peuvent pas être appliquées directement. En effet, outre le caractère de diffusion d'une transmission sans fil, les capteurs à ressources limitées peuvent être déployés dans des environnements non sécurisés et sans surveillance qui les rendent vulnérables à de nombreuses menaces. Dans ces environnements la principale menace est l'attaque physique de nœuds. Cette attaque, appelé également compromission de nœuds, a pour but de récupérer le matériel cryptographique comme les clés utilisées pour le chiffrement. Un autre objectif serait de reprogrammer le capteur attaqué.

Pour la gestion des clés qui est la brique la plus importante de tout système de sécurité, les objectifs suivants sont obligatoires :

- Efficacité de la consommation des ressources : énergie, espace mémoire, et la capacité de traitement des capteurs doivent être considérées.
- Longévité : dans certaines applications, la durée de vie est prévue d'être longue (plusieurs années). Nous devons fournir une solution de gestion de clés appropriée pour assurer la sécurité tout au long de la durée de vie de ces réseaux. Les post-déploiements des nœuds doivent être pris en compte dans le mécanisme de sécurité.
- Confidentialité : lorsqu'un capteur rejoint le réseau (après déploiement) ou le quitte (quand il consomme toute son énergie), les clés cryptographiques de ce capteur ne peuvent pas être utilisées pour lire des messages précédemment échangés (backward secrecy) ou des futurs messages qui vont être échangés (forward secrecy).
- Auto-guérison (*self-healing*) : comme nous l'avons évoqué précédemment, un nœud capteur déployé peut être capturé puis compromis. L'auto-guérison (*self-healing*) est la propriété qu'une solution de gestion de clés peut diminuer (même faire disparaître) l'effet d'une attaque de compromission de nœuds. En effet,

après la compromission d'un nœud, l'attaquant a les clés cryptographique de ce nœud et peut les exploiter pour perturber le fonctionnement du réseau. L'objectif de l'auto-guérison est de rendre les clés du nœud compromises inutiles à l'attaquant.

Nous considérons des réseaux de capteurs dynamiques où la topologie change au fil du temps selon :

- Mobilité de capteurs : un capteur peut se déplacer sur le réseau pour collecter des données et les transmettre.
- Ajout et suppression de capteurs : des capteurs peuvent être supprimés par manque d'énergie. Ils peuvent aussi être révoqués à cause d'une menace pour la sécurité. De même, de nouveaux capteurs peuvent rejoindre le réseau pour remplacer d'autres nœuds capteurs ou pour étendre la zone d'intérêt du réseau.

Un certain nombre de solutions de gestion clés avec de la mobilité sont proposées [56, 57, 58, 59]. Ces propositions supposent que le réseau est constitué d'un certain nombre de nœuds différents avec plus de capacités en ressources. En outre, quelques propositions sur la gestion des clés envisagent l'auto-guérison (self-healing) [50, 51, 52, 53, 54, 55] qui est la capacité du réseau à éliminer l'effet d'une attaque de compromission de nœuds. Cependant, les solutions existantes offrent une auto-guérison partielle ce qui signifie que l'effet du nœud compromis diminue mais ne disparaît pas définitivement. Dans notre proposition, nous présentons une nouvelle solution de pré-distribution de clés aléatoires que nous appelons E-RKP pour *Enhanced Random Key Pre-distribution*. Notre solution est conçue pour obtenir une haute résilience aux attaques de compromission de nœuds. E-RKP garantit que l'effet des nœuds compromis diminue avec le temps jusqu'à zéro. En outre, E-RKP prend en charge l'ajout de nœuds et permet aux capteurs mobiles d'établir des clés avec leurs voisins quand ils changent de positions.

Nous considérons le modèle de réseau avec des nœuds qui ont des ressources limitées tels que les capteurs et leurs applications en IoT et autres applications basées sur la collecte et/ou la détection de données. Ces réseaux sont soumis aux contraintes suivantes :

- Les capteurs sont sujets aux attaques physiques.
- Les capteurs communiquent sans fil.
- Les capteurs ont des ressources limitées en termes d'énergie (alimenté par batterie), capacités de calcul et de stockage.
- Les réseaux ont une topologie dynamique.

Cette dernière propriété, à savoir la topologie dynamique, est due à la mobilité des capteurs, mais aussi à la possibilité d'ajouter de nouveaux capteurs dans le réseau pour assurer la longévité. L'addition de capteurs peut être réalisée par deux façons :

1. Un seul capteur qui rejoint le réseau
2. Un ajout programmé de plusieurs capteurs à la fois. Dans ce cas, nous appelons époque ou génération le temps pour lequel est prévu plusieurs ajouts. Le réseau peut connaître plusieurs générations. Ce type de réseau est appelé réseau multi-phases.

Chaque capteur a une période de temps spécifique où il est en vie. Ce temps sera noté T_a . Par exemple, un capteur S_A déployé à l'instant j est en vie dans l'intervalle de temps $[j, j + T_a[$. Nous supposons également que les nœuds capteurs considérés ne sont pas connectés à toute tierce partie digne de confiance qui peut leur livrer du matériel cryptographique, ils doivent établir des clés en utilisant une solution de gestion de clés. La gestion de clés joue un rôle essentiel dans tout système de sécurité, surtout lorsque les nœuds capteurs doivent être déployés sans surveillance et/ou dans des lieux hostiles.

La cryptographie symétrique est la plus adaptée pour le déploiement de réseaux de capteurs à cause des contraintes en ressources. La pré-distribution de clés est la méthode utilisée pour fournir des clés aux capteurs lors de l'utilisation de la cryptographie symétrique. Avec cette méthode, les capteurs sont déployés dans la zone d'intérêt avec les clés requises chargées dans leurs mémoires. Dans notre modèle de réseau, nous considérons qu'un capteur peut être capturé par des attaquants. Les capteurs capturés révèlent leurs clés pré-distribuées ceci affecte les liens entre d'autres capteurs non compromis. En ce qui concerne l'attaque de compromission de nœuds, deux modèles d'attaquant peuvent être définis comme suit [50, 60] :

1. Attaquant temporaire : est un adversaire qui capture des nœuds capteurs dans une période de temps limitée, puis il arrête son attaque.
2. Attaquant avide : est un adversaire qui capture des nœuds capteurs en permanence et à un taux constant, par exemple capturer un nœud sur chaque période de temps fixe pendant la durée de vie du réseau.

Il est très difficile de faire face à la compromission de nœuds capteurs, en particulier quand le réseau prévoit la longévité. Deux solutions sont généralement utilisées pour faire face à cette attaque :

- Exclure le nœud capturé : cela implique que le réseau est capable de détecter qu'un nœud a été compromis et puis il lance un processus de rafraîchissement de clés tout en excluant le nœud capteur compromis.
- Auto-guérison : capacité du système à diminuer l'effet des nœuds compromis au fil du temps.

5.2 Solutions existantes

Eschenauer et Gligor [61] ont proposé une méthode aléatoire de pré-distribution de clés pour les RCSFs appelée RKP (*Random Key Pre-distribution*). Cette solution est considérée comme étant la solution de base dans la plupart des approches proposées dans ce domaine. Elle adresse la distribution de clés, leur révocation et leur renouvellement. La solution de distribution de clés est divisé en trois étapes : pré-distribution, découverte de clés partagées, et établissement de clés de chemin. Dans la pré-distribution de clés et avant le déploiement, un ensemble de clé S est généré et chaque clé est associée à un identifiant. Pour chaque nœud, m clés sont choisies au hasard (aléatoirement) dans l'ensemble S . Ces m clés sont stockées dans la mémoire du nœud et forment le trousseau de clés du nœud (*key ring of the node*). Le nombre de clés $|S|$ de l'ensemble est choisi de telle manière que deux sous-ensembles aléatoires de S de taille m auront une certaine probabilité p d'avoir au moins une clé en commun. Par exemple pour une probabilité de 0,5 seulement 75 clés sont stockées dans les nœuds avec $|S| = 10\ 000$ [61]. Une fois les nœuds déployés, une phase de découverte des clés partagées est effectuée. Les nœuds découvrent leurs voisins et plus particulièrement ceux avec qui ils sont en mesure de communiquer de façon sécurisée car ils possèdent une clé identique dans leur trousseau de clés respectif. Pour se faire, une simple méthode consiste à ce que chaque nœud diffuse la liste des identifiants des clés stockées dans sa mémoire. La clé partagée devient la clé de communication (du lien) entre les deux nœuds. A la fin de cette étape, le réseau est un graphe connecté formé de liens sécurisés. Les nœuds peuvent alors utiliser les liens existants pour mettre en place des clés partagées avec leurs voisins qui ne partagent pas de clés en commun avec eux c'est qu'on appelle des clés de chemin.

La révocation est employée pour éliminer le trousseau de clés d'un nœud compromis. Pour exécuter la révocation, un nœud de contrôle (qui est comparativement plus puissant en terme de ressources) annonce un message simple de révocation contenant la liste signée des identifiants des clés qui doivent être retirées. Une fois ces clés enlevées des trousseaux des nœuds, quelques liens peuvent disparaître et les nœuds affectés doivent modifier ces liens en exécutant une autre fois l'étape d'établissement de clés de chemin. Le défi de l'échange probabiliste de clés est de trouver un bon compromis entre la taille de S et la valeur m du nombre de clés par nœud pour obtenir une probabilité maximale de réseau connecté lorsque les nœuds ont été déployés. Une grande valeur de $|S|$ réduit la probabilité p de connectivité du réseau, tandis qu'une valeur plus faible diminue la sécurité en faisant tendre le modèle d'utilisation des clés vers l'équivalent

d'une clé unique partagée par le réseau. L'apport de Chan et al. dans [62] est d'étudier de nouveaux mécanismes pour améliorer la sécurité sous la pression d'une attaque. Les auteurs proposent une version modifiée de la solution où q clés en commun, et non plus une seule, sont nécessaires pour que deux nœuds voisins puissent juger leur canal de communication sécurisé. Cette proposition permet de réduire le risque qu'un nœud capturé puisse être utilisé par l'attaquant pour pénétrer le réseau. Les auteurs nomment cette proposition *q-composite keys scheme* [62]. Une autre étude [62] (*multi-path key reinforcement*) préconise de renforcer la sécurité d'un lien entre deux nœuds A et B en changeant la clé k issue de S par une valeur aléatoire. Pour éviter qu'un attaquant capable de déchiffrer les messages échangés par A et B ne puisse intercepter la nouvelle clé, les auteurs suggèrent que A connaisse les différentes routes menant à B et les utilise pour envoyer j valeurs aléatoires v_1, \dots, v_j par différents chemins. La nouvelle clé k' sera calculée par B , après réception des j valeurs comme étant : $k' = k \oplus v_1 \oplus v_2 \oplus \dots \oplus v_j$. D'autres travaux [63, 64] appliquent le principe de pré-distribution probabiliste en stockant non pas des clés dans les capteurs mais des polynômes choisis dans un espace de polynômes appelé trousseau de polynômes (*polynomial pool*).

Lorsqu'un attaquant capture un nœud dans les solutions présentées précédemment, il aura accès aux clés pré-distribuées dans le nœud victime. Ces clés restent utilisables tout au long la durée de vie du réseau. Pour faire face à ce problème, les auteurs dans [50] propose Rok (*robust key pre-distribution protocol*). Rok a les mêmes étapes de RKP. Cependant, dans l'étape de pré-distribution de clés, Rok utilise deux trousseaux de clés ($S1$ et $S2$) et chaque nœud est pré-distribué avec un nombre double de clés par rapport à RKP ($2 \times m$). Lorsque de nouveaux nœuds rejoignent le réseau, ils sont pré-distribués par des clés rafraichis dérivés des deux trousseaux $S1$ et $S2$. Avec cette méthode, l'effet d'une attaque de compromission de nœud diminue.

5.3 Solution proposée

Dans cette section, nous décrivons notre solution de gestion de clés appelée E-RKP (*Enhanced Random Key Pre-distribution*). E-RKP est basée sur la méthode de distribution aléatoire de clés et assure une auto-guérison (*self-healing*) du réseau lorsque des nœuds sont compromis. Nous commençons par présenter un tableau de la notation utilisée dans le reste du chapitre. Ensuite, nous détaillons les étapes de notre solution : pré-distribution de clés, établissement de clés avec les nœuds voisins et établissement de clés avec les nœuds mobiles. Nous montrons avec un exemple le déroulement de

notre solution.

5.3.1 Pré-distribution de clés

Cette étape consiste à mettre des clés dans chaque nœud avant le déploiement. La seule méthode pratique pour la distribution des clés aux nœuds de RCSFs dont la topologie est inconnue avant le déploiement devra compter sur la pré-distribution des clés. Toutes les notations utilisées pour décrire notre solution sont données dans le Tableau 5.1.

$ P $	Taille d'un trousseau de clés
m	un ensemble de clés
T_a	Durée de vie d'un nœud
k_{AB}	Clé partagée entre S_A and S_B
KP^j	Le trousseau de clés au temps (ou à la génération) j
$H(.)$	Fonction de hachage à sens unique ¹
ID_i^j	Identifiant de la clé i dans le KP^j

TABLE 5.1 – Notation.

Avant le déploiement, une phase de pré-distribution de clés est effectuée. Un grand ensemble P de clés est généré et qui représente l'ensemble de clés de la dernière génération de nœuds capteurs KP^n . Pour chaque nœud S de la génération i , m clés sont choisies au hasard à partir de l'ensemble KP^i de sa génération. Le nombre de clés $|P|$ de l'ensemble P est choisi de telle manière que deux sous-ensembles aléatoires de P de taille m auront une certaine probabilité p d'avoir au moins une clé en commun. Les trousseaux de clés des autres générations sont générés à partir de KP^n en utilisant une fonction de hachage à sens unique de la génération $n - 1$ à la génération 1 : $KP^j = k, k = H(k') | k' \in KP^{j+1}$. La Figure 5.1 illustre cette opération. Grâce à la fonction de hachage qui ne permet pas de calculer une clé k^j de l'époque j à partir de la clé k^{j+1} . A partir de k^j , la clé k^{j-1} est calculé comme suit : $H(k^j) = k^{j-1}$. Un attaquant qui capture des nœuds capteurs à l'époque j ne peut calculer aucune clés des prochaines générations de nœuds capteurs qui vont être déployées.

1. La fonction de hachage transforme un message clair de longueur quelconque en un message de longueur fixe. sa spécificité est qu'à partir de $H(M)$, il est impossible de retrouver M .

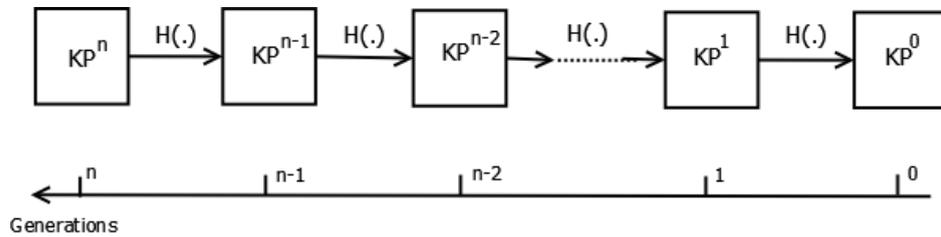


FIGURE 5.1 – La génération de clés.

5.3.2 Établissement de clés avec les nœuds voisins

Chaque nœud doit découvrir ses voisins directs, c. à d. qui se trouvent dans sa portée de communication sans fil. Un lien existe entre deux nœuds capteurs seulement s'ils partagent une clé. Après le déploiement, chaque nœud capteur diffuse ses identifiants de clés. Ensuite, chaque nœud capteur peut identifier les clés communes partagées avec chaque voisin. Chaque deux nœuds voisins qui partagent un ou plusieurs clés calculent leur clé partagée en hachant toutes les clés partagées. Si deux nœuds voisins ne partagent aucune clé, ils échangent leurs listes de voisins. S'ils trouvent un voisin commun, ils demandent à ce voisin commun de générer et de leur envoyer une clé partagée pour sécuriser leurs communications.

5.3.3 Établissement de clés avec les nœuds mobiles

Un nœud capteur peut changer de position. Notre solution assure un établissement de clés entre un nœud mobile et ces nouveaux voisins quand il change de position. A son arrivée à sa nouvelle position le nœud capteur diffuse le numéro de génération et ses identifiants de clés. Nous considérons le réseau mobile à ce moment donné comme une instance du réseau statique correspondant. Le nœud mobile dans sa nouvelle position reprend la phase d'établissement de clés décrite dans la sous-section précédente. Les nœuds capteurs voisins diffusent à leur tour leurs identifiants de clés. Le nœud mobile peut identifier les clés communes (une ou plusieurs clés) partagées avec chacun de ses nœuds capteurs voisins. La clé partagée entre le nœud mobile et un nœud voisin est calculée en hachant toutes les clés partagées dans l'ordre croissant de leurs identifiants de clés.

5.3.4 Illustration par exemple

Nous présentons l'exemple suivant pour expliquer notre approche. La Figure 5.2 montre 4 nœuds capteurs où les nœuds 1 et 2 sont déployés à l'époque 1 (génération 1) et les nœuds 3 et 4 rejoignent le réseau à l'époque 2. Chaque nœud est pré-distribué avec 3 clés. En RKP [61] (Fig. 2 (a)), la capture du nœud 1 révèle les clés K_1 , K_3 et K_4 par conséquent les liens entre les nœuds 1 et 2, les nœuds 1 et 3 et même les nœuds 3 et 4 deviennent corrompus. Dans E-RKP (Fig. 2 (b)), les clés sont rafraichies à chaque génération (époque). Le nœud 3 est pré-distribué avec les nouvelles clés K'_1 , K'_2 et K'_4 où $H(K'_1) = K_1$, $H(K'_2) = K_2$ et $H(K'_4) = K_4$. Le nœud 4 est pré-distribué avec K'_4 , K'_5 et K'_6 où $H(K'_4) = K_4$, $H(K'_5) = K_5$ et $H(K'_6) = K_6$. Maintenant, si le nœud 1 est compromis, les clés K_1 , K_3 et K_4 sont divulguées mais la clé partagée entre les nœuds 3 et 4 ne peut pas être compromise car il est impossible à l'attaquant de calculer K'_4 en connaissant K_4 .

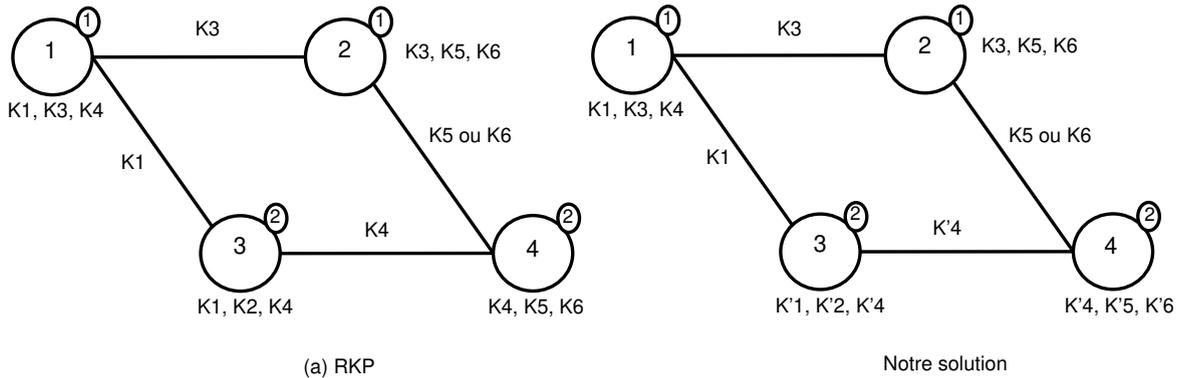


FIGURE 5.2 – Exemple d'établissement de clés avec les nœuds voisins.

Maintenant supposons que le nœud 4 change de position et bouge vers un nouveau emplacement comme le montre la Figure 5.3. Pour que le nœud 4 établisse un lien sécurisé avec son nouveau voisin le nœud 1, il diffuse la liste de ces identifiants de clés ainsi que son numéro de génération. Ensuite, le nœud 1 diffuse à son tour ces identifiants de clés et le numéro de sa génération. Le nœud 4 fait une opération de hachage sur sa clé K'_4 pour trouver la clé K_4 qui sera utilisée pour sécuriser les communications avec le nœud 1.

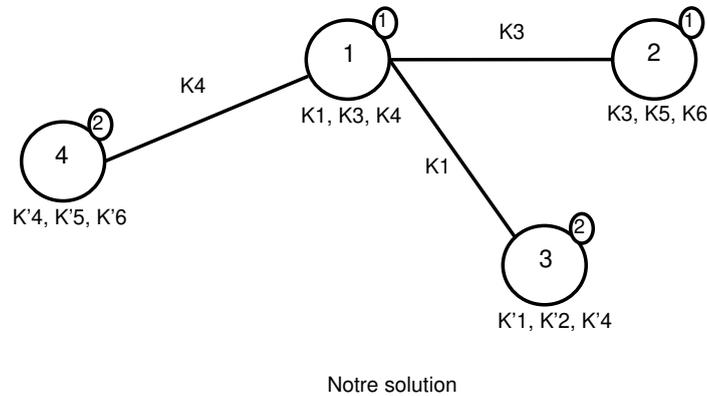


FIGURE 5.3 – Exemple d'établissement de clés avec les nœuds mobiles.

5.4 Évaluation

Nous évaluons dans cette section notre solution E-RKP. Nous utilisons les métriques d'évaluation définies ci-après.

5.4.1 Métriques d'évaluation

Des métriques sont employées pour comparer les différents solutions de gestion de clés, ces métriques sont :

- Efficacité : les limitations en mémoire et en capacité de traitement des nœuds doivent être considérés.
- Complexité en mémoire : quantité de mémoire nécessaire pour stocker les clés.
- Complexité en communication : nombre de messages échangés pour la gestion de clés.
- Connectivité en terme de clé (*key connectivity*) : probabilité que deux nœuds (ou plus) partagent une clé.
- Résilience à la capture de nœud : ou résistance à la capture de nœud, cette métrique mesure à quel point le RCSF est compromis quand un nœud est compromis, et l'influence de ce nœud sur la sécurité du réseau.
- Mobilité : La plupart des architectures de RCSFs supposent que les nœuds capteurs sont fixes (sans mouvement). Cependant, la mobilité des stations de base ou des nœuds capteurs ou les deux est nécessaire dans certaines applications. Par conséquent, l'établissement de clés devrait être en mesure de distribuer de

nouvelles clés pour les nœuds mobiles lorsque ces derniers changent de position leur permettant ainsi de communiquer avec leurs nouveaux voisins.

5.4.2 Résultat

- Connectivité en terme de clés

Dans cette sous-section, nous calculons la connectivité en terme de clés de notre proposition lorsque nous sélectionnons au hasard deux voisins S_i et S_j dans un réseau déployé. Soit $A(S_i, S_j)$ l'événement où S_i et S_j peuvent établir une clé partagée. La probabilité de cet événement est de :

$$P_{our} = \begin{cases} P[A(S_i, S_j) | S_i \text{ and } S_j \in \text{to a same epoch}] \\ \text{or} \\ P[A(S_i, S_j) | S_i \text{ and } S_j \in \text{to different epoch}] \end{cases} \quad (5.1)$$

La Figure 5.4 présente la variation de la connectivité en terme de clés de notre solution E-RKP en fonction de la taille du trousseau. Nous pouvons voir que E-RKP offre une bonne connectivité en terme de clé lorsque nous choisissons la valeur adéquate pour la valeur de m par rapport au nombre de clés dans P . Par exemple, pour $m = 220$ et $P = 10000$, nous avons une connectivité en terme de clé presque égale à un. En outre, lorsque deux nœuds voisins ne trouvent pas une clé commune, ils peuvent établir une clé partagée via un voisin commun. Cela augmente la connectivité en terme de clé de E-RKP.

- Résistance à la capture de nœuds

Nous calculons la probabilité de corrompre un lien entre deux nœuds non compromis lorsqu'un nœud est capturé. Soit c le nombre de nœuds compromis. La probabilité qu'une clé pré-distribuée ne soit pas compromise est : $(1 - \frac{m}{P})^c$. La probabilité que la

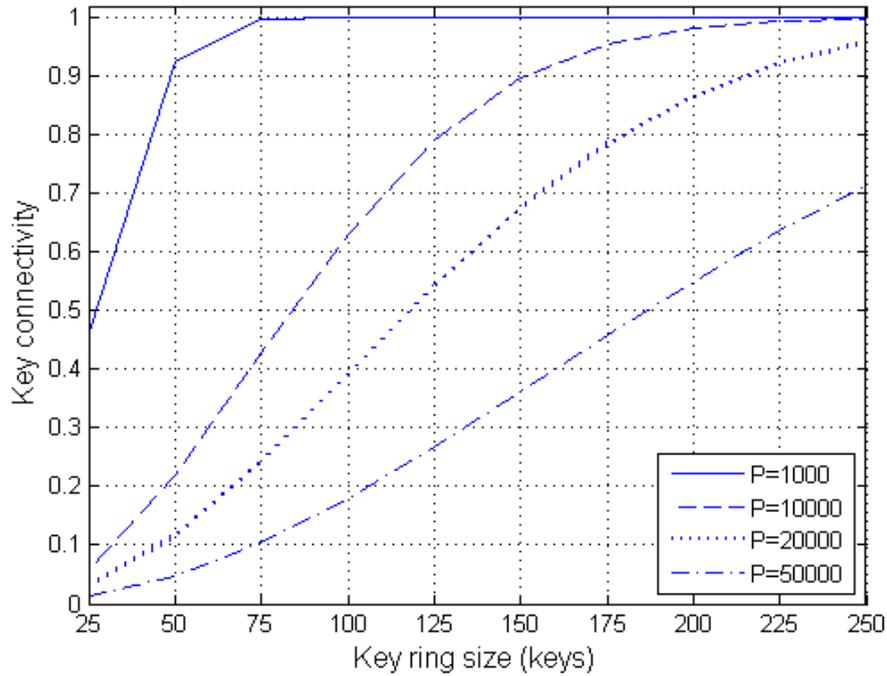


FIGURE 5.4 – Connectivité en terme de clés.

clé pré-distribuée entre deux nœuds soit compromis est :

$$P_c = 1 - \left(1 - \frac{m}{P}\right)^c \quad (5.2)$$

La Figure 5.5 présente l'évolution de la probabilité de compromettre un lien entre deux nœuds en fonction du nombre de nœuds dans le réseau. P est égale à 10000 et $m = 50, 100, 150, 200, 250$. On remarque que : quand la valeur de m augmente, la probabilité de compromettre une clé partagée augmente.

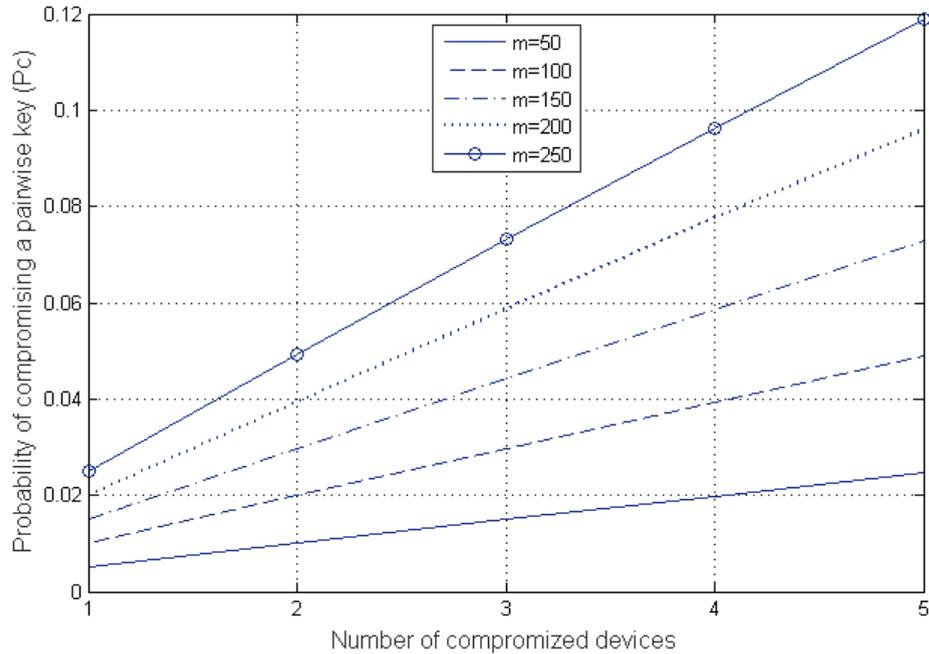


FIGURE 5.5 – Resilience of E-RKP

- Auto-guérison (Self-healing)

Pour montrer que E-RKP assure une auto-guérison complète après une compromission, nous simulons un scénario avec un ajout de quatre générations de nœuds. Dans chaque génération de nœuds, un attaquant capture cinq nœuds au hasard. Le nombre de clés du trousseau P est 10000 clés et m prend les valeurs suivantes : 50, 100, 150, 200, 250. Lorsqu'un attaquant capture un nœud, il obtient m clé de P . Parce chaque nœud est pré-distribué avec des clés rafraichies de son trousseau de clés de génération, E-RKP garantit que l'impact de l'attaque de capture de nœud diminue au fur et à mesure des post-déploiements. Les dommages causés par des clés compromises disparaissent avec le temps, car les nœuds ajoutés sont pré-distribués avec de nouvelles clés qui ne peuvent pas être calculées à partir des clés compromises. Comme le montre la Figure 5.6, l'impact causé par un attaquant diminue.

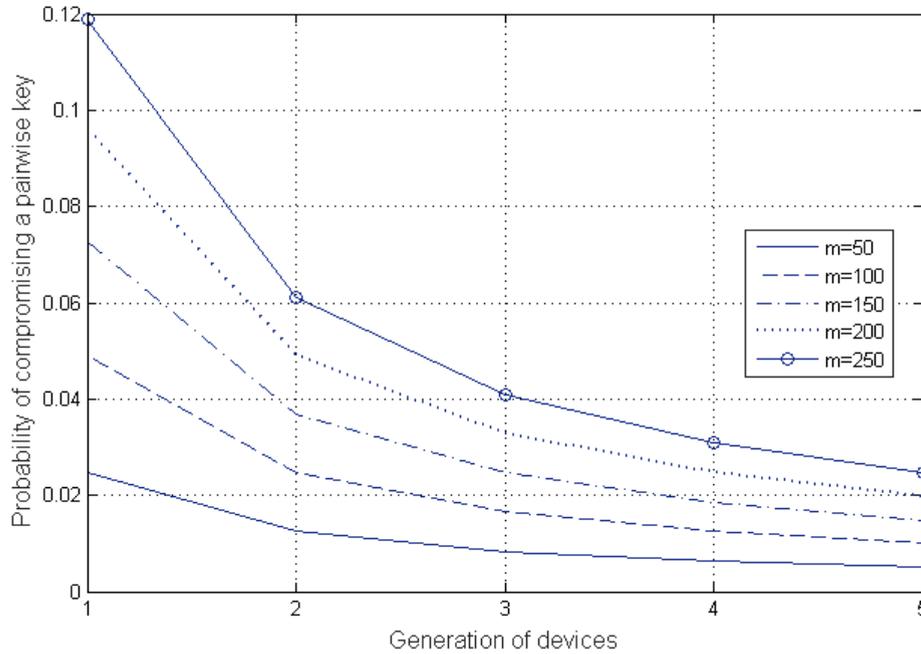


FIGURE 5.6 – Auto-guérison de E-RKP

- Complexité en mémoire, en communication et en calcul

Dans E-RKP, chaque nœud doit stocker m clés avec leurs identifiants. Soit l la taille d'une clé et l' la taille d'un identifiant de clé en bits. Ainsi, le besoin total en stockage d'un nœud est : $m \times (l + l')$ bits avant le déploiement. De plus, chaque nœud stockera les clés établies avec ses voisins après le déploiement. Soit d le nombre moyen de nœuds voisins d'un nœud dans le réseau. Donc, un nœud doit stocker : $m \times (l + l') + d \times l$, quand nous considérons que la clé établie entre un nœud et son voisin a la même taille que la clé du trousseau P .

En ce qui concerne la complexité en communication, chaque nœud dans E-RKP diffuse un message et reçoit d messages de ses voisins. Si l'établissement de clés directe échoue avec certains nœuds voisins, ils passent à l'établissement de clé à l'aide de voisins communs ce qui nécessite un échange de deux messages supplémentaires.

En ce qui concerne la complexité en calcul (traitement), chaque nœud doit effectuer une seule opération de hachage pour calculer chacune de ses clés partagées.

- Efficacité énergétique

Le Tableau 5.2 présente les valeurs des paramètres nécessaires pour évaluer la consommation en énergie. Nous avons utilisé le même modèle de consommation d'énergie présenté dans le chapitre précédent et nous avons utilisé MATLAB² pour simuler des déploiements aléatoires des nœuds capteurs.

TABLE 5.2 – Paramètres de simulation.

Taille du réseau	1000 m \times 1000 m
Nombre de nœuds	500
Énergie initiale	1 <i>Joule</i>
Taille d'un paquet	4000 <i>bits</i>
E_{elec}	50 <i>nJ/bit</i>
E_{amp} ($\alpha = 2$)	10 <i>pJ/bit/m²</i>
E_{amp} ($\alpha = 4$)	0.0013 <i>pJ/bit/m⁴</i>
Distance d_0	87 <i>m</i>
Taille d'un identifiant de clé	32 <i>bits</i>

La Figure 5.7 mesure la consommation moyenne d'énergie d'un nœud pour différentes valeurs de m . Quand la valeur de m augmente la consommation d'énergie dans la phase d'établissement de clés augmente. De plus, la densité de nœuds dans le réseau affecte la consommation d'énergie, car les nœuds doivent établir une clé partagée avec chaque voisin.

2. *MATrix LABoratory* : un langage de programmation développé par la société *The MathWorks*.

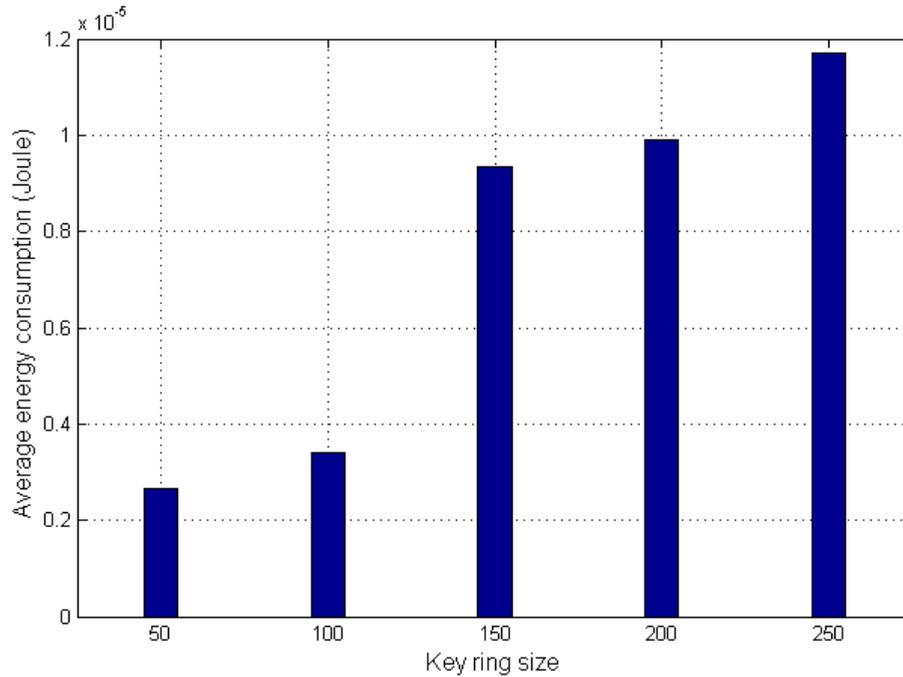


FIGURE 5.7 – Énergie moyenne consommée.

- Comparaison avec d'autres solutions

Nous comparons E-RKP avec deux solutions discutées en section 2 : Rok [50] et RKP [61]. E-RKP diffère de Rok [50] dans la phase de génération de clés. De plus, E-RKP permet à un nœud mobile d'établir des clés avec ses nouveaux nœuds voisins quand il change d'emplacement. Le Tableau 5.3 présente la connectivité en terme de clés des trois solutions. Rok [50] présente la valeur la plus élevée car le nombre de clés pré-distribuées est $2 \times m$. De plus, Rok a besoin de la synchronisation des horloges des nœuds pour le rafraichissement de clés et ne traite pas la mobilité. E-RKP ne nécessite pas une synchronisation des nœuds dans le réseau, assure l'auto-guérison et permet aux nœuds mobiles d'établir des clés avec leurs voisinages.

Solution	réseau synchronisé	Connectivité en terme de clés	Auto-guérison	Mobilité
Rok [50]	Oui	0,999	Oui	Non
RKP [61]	Non	0,982	Non	Non
E-RKP	Non	0,982	Oui	Oui

TABLE 5.3 – Comparaison E-RKP, Rok et RKP.

5.5 Conclusion

La sécurité est un enjeu décisif pour les RCSFs en raison de la nature du déploiement et des ressources limitées des nœuds capteurs sans fil utilisés dans un tel réseau. Le principal défi de la gestion de clés dans les RCSFs réside dans les limitations de ressources. Dans ce chapitre, nous avons proposé E-RKP ; une solution de gestion de clés qui supporte la mobilité et fait face à l'attaque la plus fréquente et la plus difficile qui est la compromission de nœuds. E-RKP utilise une distribution aléatoire de clés avec le calcul de plusieurs ensembles de clés de génération avec une fonction de hachage. E-RKP permet aux nœuds capteurs déployés d'établir un lien sécurisé avec leurs voisins statiques et mobiles. Nous avons évalué par simulation la consommation énergétique de E-RKP. Les résultats d'évaluation montrent que E-RKP résiste à l'attaque de compromission de nœuds et offre une très bonne connectivité ainsi qu'une complexité en communication raisonnables.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Avec l'engouement de connecter tout objet à l'Internet, de nombreuses perspectives d'applications ont récemment été ouvertes en utilisant les RCSFs. Les RCSFs sont de plus en plus utilisés dans des applications de surveillance de grands systèmes dans divers domaines : le militaire, l'environnement, la santé, ..., etc. Leur remarquable essor est dû à leur taille de plus en plus réduite, leur prix de plus en plus faible ainsi que leur support de communication sans fil attrayant et peu encombrant. Ce qui a fait que les RCSFs constituent un sujet de recherche innovant pour diverses disciplines des sciences et techniques de l'information et de la communication et ils sont apparus comme une technologie prometteuse pour un grand nombre d'applications avec des besoins différents. Dans certaines applications de ces réseaux, il existe encore quelques obstacles à surmonter avant qu'ils deviennent enfin une technologie mature. L'un des principaux obstacles est la gestion de la mobilité de ou des stations de base et des nœuds capteurs. En effet, la mobilité peut être utilisée comme une technique pour améliorer les performances du réseau notamment pour l'optimisation de l'énergie des batteries des nœuds capteurs qui est une ressource importante pour la durée de vie du réseau. En outre, la gestion de la mobilité peut être une exigence dans certaines applications telles que la surveillance des patients où les nœuds capteurs sont attachés à une entité mobile.

La concentration du trafic de données vers une station de base fixe provoque l'épuisement des batteries des nœuds capteurs fixes à un saut de la station de base. Pour faire face à ce problème de perte de données et de connectivité, l'utilisation d'une station de base mobile est proposée. La station de base mobile offre un équilibrage de charge

implicite en contribuant à une consommation d'énergie mieux répartie à travers le réseau. En outre, la mobilité est une technique importante permettant l'extension de la surface du réseau. Les solutions proposées sont variées et s'appliquent particulièrement à toutes les couches protocolaires du réseau : au niveau routage, au niveau MAC et au niveau données. Au niveau routage, il s'agit d'optimiser l'acheminement des paquets de données captées vers la station de base. Au niveau MAC, il s'agit d'améliorer le contrôle d'accès au médium (MAC) afin d'optimiser la gestion des communications sans fil. Au niveau données, il s'agit d'appliquer des fonctions d'agrégation afin de diminuer le volume et le nombre de données envoyées. Cependant, peu de solutions répondent aux applications des RCSFs qui intègrent des éléments mobiles. Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la gestion de la mobilité dans les RCSFs. Bien que la mobilité est généralement vue comme une contrainte puisqu'elle accentue l'aspect dynamique de la topologie du réseau, elle peut être utilisée pour améliorer les performances du réseau de différentes manières. En utilisant la mobilité, nous pouvons réduire le nombre de sauts qu'un paquet de données doit parcourir pour atteindre la station de base. Un autre avantage de la mobilité est de diminuer la perte de données puisque la probabilité de perdre des paquets de données augmente avec le nombre de sauts parcourus par ces paquets pour arriver à une destination.

Au problème de la gestion de la mobilité s'ajoute le besoin de protéger les communications dans un RCSF. Un système de chiffrement adapté aux caractéristiques des nœuds capteurs doit être appliqué. Les RCSFs sont souvent déployés dans des endroits hostiles ou lointains peu sûrs. Par conséquent, il est nécessaire de proposer des solutions de sécurité adéquates aux particularités de ces réseaux et plus particulièrement lorsque les nœuds sont mobiles.

Contributions de la thèse

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à la gestion de la mobilité dans les RCSFs. Dans un premier temps, nous avons travaillé sur l'utilisation d'une station de base mobile pour assurer la collecte de données. Nous avons constaté qu'une mobilité optimisée de la station de base améliore les performances du réseau notamment la métrique de la consommation d'énergie. La bonne gestion de la mobilité de la station de base consiste à calculer l'itinéraire le plus intéressant de la station de base. Cela permet de prolonger la durée de vie du réseau et de minimiser les pertes de paquets. Par conséquent, nous avons proposé une solution de collecte de données basée sur une

mobilité contrôlée de la station de base. La première étape de notre proposition consiste à organiser le réseau en une topologie grille afin de faciliter la collecte de données. Dans chaque cellule de la grille, un algorithme est proposé pour choisir le chef de la cellule pour un cycle de temps. Un autre algorithme pour gérer le déplacement de la station de base est également proposé. Cet algorithme prend en considération l'énergie des chefs des cellules pour leur éviter d'envoyer leurs paquets à de grandes distances. La station de base calcule à chaque cycle de collecte de données un nouveau point où elle doit se placer en prenant en compte les variations des niveaux d'énergie des chefs de cellules ce qui assure un équilibrage de charge et la consommation énergétique des chefs de cellule.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la mobilité pour la sécurité dans un RCSF. Nous avons rapproché la mobilité à la problématique de la gestion de clés dans les RCSFs afin d'améliorer la connectivité dans le réseau à travers la mobilité et de renforcer la sécurité du réseau notamment pour le processus d'établissement de clés pour les nœuds mobiles. Nous avons présenté une nouvelle approche de gestion de clés. Ici, nous supposons que tout nœud dans le réseau peut se déplacer. Notre proposition assure qu'un nœud dans le réseau peut établir une communication sécurisée avec l'établissement d'une clé partagée entre le nœud capteur et ses voisins.

Perspectives

Les travaux effectués dans cette thèse ouvrent plusieurs perspectives de recherche. Dans ce qui suit, nous en citons quelques unes :

- Nous avons travaillé avec une seule station de base mobile mais qu'en est-il s'il y en a plusieurs ? Pour coordonner plusieurs stations de base mobiles, plusieurs stratégies peuvent être considérées. Il serait intéressant d'étudier leur impact selon le but recherché : conservation d'énergie, perte de paquets, etc. Dans ce cadre, les algorithmes auto-stabilisants peuvent être considérés afin que le réseau puisse s'adapter tout seul aux différents cas de niveaux d'énergie.

- Pour diminuer la perte de paquets avec une station de base mobile, on peut également introduire des règles de décision au niveau des nœuds capteurs pour décider d'envoyer ou pas les données captées. Par exemple, nous pourrions intégrer les priorités de données dans l'envoi des données captées. De plus, dans un contexte de données

massives des solutions d'agrégation s'imposent.

- Dans notre approche, les chefs de cellule communiquent directement avec la station de base et dépensent plus d'énergie que les autres nœuds. Pour éviter cela, on peut s'appuyer sur une couche supplémentaire qui permet une communication inter-cellules, entre chefs de cellules par exemple, afin de leur éviter d'utiliser des communications longue distance.

- Aussi, la construction de la grille peut être adaptée au niveau actuel de l'énergie dans le réseau en permettant à la station de base de relancer une nouvelle construction de la grille en fixant une portée calculée qui tient compte du niveau d'énergie des nœuds capteurs.

- Une autre perspective très intéressante est de voir la mobilité comme stratégie de tolérance aux pannes dans les RCSFs. Avec des ressources limitées notamment l'énergie, les nœuds capteurs peuvent être affectés par des pannes qui peuvent entraîner un dysfonctionnement de l'opération de collecte de données dans le réseau. La mobilité de la station de base ou des nœuds capteurs peut être utilisée pour assurer une connectivité suffisante pour la mission du réseau.

- Les stations de base mobiles peuvent également être utilisées pour la gestion de clés afin d'éviter la déconnexion des réseaux.

- On peut également exploiter la mobilité pour proposer un mécanisme de gestion de confiance dans les RCSFs afin de fournir une solution qui vient compléter le niveau de sécurité proposé par la cryptographie.

Bibliographie

- [1] AKYILDIZ, Ian F., SU, Weilian, SANKARASUBRAMANIAM, Yogesh, et al. A survey on sensor networks. *Communications magazine, IEEE*, 2002, vol. 40, no 8, p. 102-114.
- [2] HEINZELMAN, Wendi Rabiner, CHANDRAKASAN, Anantha, et BALAKRISHNAN, Hari. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In : *System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on*. IEEE, 2000. p. 10, vol. 2.
- [3] J.N Al-Karaki et A. E. Kamal, « Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey », *Magazine : IEEE Communications*, vol. 11, N° 6, p. 6-28, Dec. 2004.
- [4] TILAK, Sameer, ABU-GHAZALEH, Nael B., et HEINZELMAN, Wendi. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2002, vol. 6, no 2, p. 28-36.
- [5] SINGH, Shio Kumar, SINGH, M. P., et SINGH, D. K. Applications, Classifications, and Selections of Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies*, 2010.
- [6] MIELKE, ANGELA M. Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks*, 2008, vol. 62, p. 21.
- [7] KARL, Holger et WILLIG, Andreas. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2007.
- [8] ROMER, Kay et MATTERN, Friedemann. The design space of wireless sensor networks. *Wireless Communications, IEEE*, 2004, vol. 11, no 6, p. 54-61.
- [9] CHANG, Jae-Hwan, TASSIULAS, Leandros, et al. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In : *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. IEEE, 2000. p. 22-31.

- [10] GIRIDHAR, Arvind et KUMAR, P. R. Maximizing the functional lifetime of sensor networks. In : Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks. IEEE Press, 2005. p. 2.
- [11] MHATRE, Vivek P., ROSENBERG, Catherine, KOFMAN, Daniel, et al. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, vol. 4, no 1, p. 4-15.
- [12] TIAN, Di et GEORGANAS, Nicolas D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In : Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications. ACM, 2002. p. 32-41.
- [13] KHAN, Moazzam et MISIC, Jelena. Security in IEEE 802.15.4 cluster based networks. Security in Wireless Mesh Networks, 2008, vol. 6.
- [14] DIETRICH, Isabel et DRESSLER, Falko. On the lifetime of wireless sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2009, vol. 5, no 1, p. 5.
- [15] ARISHA, Khaled, YOUSSEF, Moustafa, et YOUNIS, Mohamed. Energy-aware TDMA-based MAC for sensor networks. In : System-level power optimization for wireless multimedia communication. Springer, Boston, MA, 2002. p. 21-40.
- [16] HAARTSEN, Jaap C. The Bluetooth radio system. IEEE personal communications, 2000, vol. 7, no 1, p. 28-36.
- [17] RAJENDRAN, Venkatesh, OBRACZKA, Katia, et GARCIA-LUNA-ACEVES, Jose Joaquin. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. Wireless networks, 2006, vol. 12, no 1, p. 63-78.
- [18] LINDSEY, Stephanie et RAGHAVENDRA, Cauligi S. PEGASIS : Power-efficient gathering in sensor information systems. In : Aerospace conference proceedings, 2002. IEEE. IEEE, 2002. p. 3-3.
- [19] LI, Jian et MOHAPATRA, Prasant. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. Pervasive and Mobile Computing, 2007, vol. 3, no 3, p. 233-254.
- [20] DANTU, Karthik, RAHIMI, Mohammad, SHAH, Hardik, et al. Robomote : enabling mobility in sensor networks. In : Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks. IEEE Press, 2005. p. 55.
- [21] NAZIR, Babar et HASBULLAH, Halabi. Mobile sink based routing protocol (MSRP) for prolonging network lifetime in clustered wireless sensor network. In : Computer applications and industrial electronics (ICCAIE), 2010 International Conference on. IEEE, 2010. p. 624-629.

- [22] WANG, Wei, SRINIVASAN, Vikram, et CHUA, Kee-Chaing. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks. In : Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2005. p. 270-283.
- [23] LUO, Jun et HUBAUX, J.-P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. In : INFOCOM 2005. 24th annual joint conference of the IEEE computer and communications societies. Proceedings IEEE. IEEE, 2005. p. 1735-1746.
- [24] WANG, Z. Maria, BASAGNI, Stefano, MELACHRINOUDIS, Emanuel, et al. Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime. In : System Sciences, 2005. HICSS'05. Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on. IEEE, 2005. p. 287a-287a.
- [25] INTANAGONWIWAT, Chalermek, GOVINDAN, Ramesh, et ESTRIN, Deborah. Directed diffusion : a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2000. p. 56-67.
- [26] KULIK, Joanna, HEINZELMAN, Wendi, et BALAKRISHNAN, Hari. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2002, vol. 8, no 2/3, p. 169-185.
- [27] TACCONI, D., CARRERAS, I., MIORANDI, D., et al. A system architecture supporting mobile applications in disconnected sensor networks. In : Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM'07. IEEE. IEEE, 2007. p. 833-837.
- [28] BI, Yanzhong, SUN, Limin, MA, Jian, et al. HUMS : an autonomous moving strategy for mobile sinks in data-gathering sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007, vol. 2007, no 1, p. 064574.
- [29] SOMASUNDARA, Arun A., RAMAMOORTHY, Aditya, et SRIVASTAVA, Mani B. Mobile element scheduling for efficient data collection in wireless sensor networks with dynamic deadlines. In : Real-Time Systems Symposium, 2004. Proceedings. 25th IEEE International. IEEE, 2004. p. 296-305.
- [30] BI, Yanzhong, NIU, Jianwei, SUN, Limin, et al. Moving schemes for mobile sinks in wireless sensor networks. In : Performance, Computing, and Communications Conference, 2007. IPCCC 2007. IEEE International. IEEE, 2007. p. 101-108.
- [31] VLAJIC, Natalija et STEVANOVIC, Dusan. Sink mobility in wireless sensor networks : a (mis) match between theory and practice. In : Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing : Connecting the World Wirelessly. ACM, 2009. p. 386-393.

- [32] GU, Yu, REN, Fuji, JI, Yusheng, et al. The evolution of sink mobility management in wireless sensor networks : A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 18, no 1, p. 507-524.
- [33] TALEB, A. Abu, ALHMIEDAT, Tareq, HASSAN, Osama Al-haj, et al. A survey of sink mobility models for wireless sensor networks. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 2013, vol. 4, no 9, p. 679-687.
- [34] NAZIR, Babar et HASBULLAH, Halabi. Mobile sink based routing protocol (MSRP) for prolonging network lifetime in clustered wireless sensor network. In : 2010 International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics. IEEE, 2010. p. 624-629.
- [35] LUO, Jun, PANCHARD, Jacques, PIÓRKOWSKI, Micha, et al. Mobiroute : Routing towards a mobile sink for improving lifetime in sensor networks. In : International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. p. 480-497.
- [36] KIM, Hyung Seok, ABDELZAHHER, Tarek F., et KWON, Wook Hyun. Minimum-energy asynchronous dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks. In : Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, 2003. p. 193-204.
- [37] SHI, Lei, ZHANG, Baoxian, MOUFTAH, Hussein T., et al. DDRP : an efficient data ?driven routing protocol for wireless sensor networks with mobile sinks. *International Journal of Communication Systems*, 2013, vol. 26, no 10, p. 1341-1355.
- [38] LUO, Haiyun, YE, Fan, CHENG, Jerry, et al. TTDD : Two-tier data dissemination in large-scale wireless sensor networks. *Wireless networks*, 2005, vol. 11, no 1-2, p. 161-175.
- [39] WANG, N.-C. et CHIANG, Y.-K. Power-aware data dissemination protocol for grid-based wireless sensor networks with mobile sinks. *IET communications*, 2011, vol. 5, no 18, p. 2684-2691.
- [40] LI, Xu, YANG, Jiulin, NAYAK, Amiya, et al. Localized geographic routing to a mobile sink with guaranteed delivery in sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, vol. 30, no 9, p. 1719-1729.
- [41] BOSE, Prosenjit, MORIN, Pat, STOJMENOVI?, Ivan, et al. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks. *Wireless networks*, 2001, vol. 7, no 6, p. 609-616.
- [42] YU, Fucai, PARK, Soochang, LEE, Euisin, et al. Elastic routing : a novel geographic routing for mobile sinks in wireless sensor networks. *IET communications*, 2010, vol. 4, no 6, p. 716-727.

- [43] KARP, Brad et KUNG, Hsiang-Tsung. GPSR : Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In : Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2000. p. 243-254.
- [44] KHAN, Abdul Waheed, ABDULLAH, Abdul Hanan, RAZZAQUE, Mohammad Abdur, et al. VGDD : a virtual grid based data dissemination scheme for wireless sensor networks with mobile sink. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, vol. 11, no 2, p. 890348.
- [45] BASAGNI, Stefano, CAROSI, Alessio, MELACHRINOUDIS, Emanuel, et al. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime. Wireless Networks, 2008, vol. 14, no 6, p. 831-858.
- [46] KINALIS, Athanasios, NIKOLETSEAS, Sotiris, PATROUMPA, Dimitra, et al. Biased sink mobility with adaptive stop times for low latency data collection in sensor networks. Information fusion, 2014, vol. 15, p. 56-63.
- [47] TANG, Bo, WANG, Jin, GENG, Xuehua, et al. A novel data retrieving mechanism in wireless sensor networks with path-limited mobile sink. Int. J. Grid Distrib. Comput, 2012, vol. 5, p. 133-140.
- [48] SZEWCZYK, Robert, MAINWARING, Alan, POLASTRE, Joseph, et al. An analysis of a large scale habitat monitoring application. In : Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, 2004. p. 214-226.
- [49] WOO, Alec, TONG, Terence, et CULLER, David. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In : Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, 2003. p. 14-27.
- [50] CASTELLUCCIA, Claude et SPOGNARDI, Angelo. Rok : A robust key pre-distribution protocol for multi-phase wireless sensor networks. In : 2007 Third International Conference on Security and Privacy in Communications Networks and the Workshops-SecureComm 2007. IEEE, 2007. p. 351-360.
- [51] KALKAN, Kubra, YILMAZ, Sinem, YILMAZ, Omer Zekvan, et al. A highly resilient and zone-based key pre-distribution protocol for multiphase wireless sensor networks. In : Proceedings of the 5th ACM symposium on QoS and security for wireless and mobile networks. ACM, 2009. p. 29-36.
- [52] MIYAJI, Atsuko et OMOTE, Kazumasa. How to build random key pre-distribution schemes with self-healing for multiphase wsns. In : 2013 IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). IEEE, 2013. p. 205-212.

- [53] SUN, Yi, CAO, Yongfeng, et TANG, Liangrui. A multi-phase key pre-distribution scheme based on hash chain. In : 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. IEEE, 2012. p. 2061-2064.
- [54] ZHOU, Boqing, LI, Sujun, WANG, Jianxin, et al. A Pairwise Key Establishment Scheme for Multiple Deployment Sensor Networks. *IJ Network Security*, 2014, vol. 16, no 3, p. 229-236.
- [55] MESSAI, Mohamed-Lamine et SEBA, Hamida. A survey of key management schemes in multi-phase wireless sensor networks. *Computer Networks*, 2016, vol. 105, p. 60-74.
- [56] KHAN, Sarmad Ullah, LAVAGNO, Luciano, PASTRONE, Claudio, et al. An effective key management scheme for mobile heterogeneous sensor networks. In : International Conference on Information Society (i-Society 2011). IEEE, 2011. p. 98-103.
- [57] KHAN, Sarmad Ullah, PASTRONE, Claudio, LAVAGNO, Luciano, et al. A secure online key establishment scheme for mobile heterogeneous sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, vol. 10, no 11, p. 925479.
- [58] REN, Yi, OLESHCHUK, Vladimir A., LI, Frank Yong, et al. Security in mobile wireless sensor networks-A survey. 2011.
- [59] SÁNCHEZ, David Sánchez et BALDUS, Heribert. Key management for mobile sensor networks. In : International Workshop on Secure Mobile Ad-hoc Networks and Sensors. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. p. 14-26.
- [60] MIYAJI, Atsuko et OMOTE, Kazumasa. Self-healing wireless sensor networks. *Concurrency and Computation : Practice and Experience*, 2015, vol. 27, no 10, p. 2547-2568.
- [61] ESCHENAUER, Laurent et GLIGOR, Virgil D. A key-management scheme for distributed sensor networks. In : Proceedings of the 9th ACM conference on Computer and communications security. ACM, 2002. p. 41-47.
- [62] CHAN, Haowen, PERRIG, Adrian, et SONG, Dawn. Random key predistribution schemes for sensor networks. IEEE, 2003.
- [63] LIU, Donggang, NING, Peng, et LI, Rongfang. Establishing pairwise keys in distributed sensor networks. *ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC)*, 2005, vol. 8, no 1, p. 41-77.
- [64] LIU, Donggang, NING, Peng, et LI, Rongfang. Establishing pairwise keys in distributed sensor networks. *ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC)*, 2005, vol. 8, no 1, p. 41-77.

- [65] KHAN, Abdul Waheed, ABDULLAH, Abdul Hanan, RAZZAQUE, Mohammad Abdur, et al. VGDRA : a virtual grid-based dynamic routes adjustment scheme for mobile sink-based wireless sensor networks. *IEEE sensors journal*, 2015, vol. 15, no 1, p. 526-534.
- [66] ESKOFIER, Bjoern, LEE, Sunghoon, BARON, Manuela, et al. An overview of smart shoes in the internet of health things : gait and mobility assessment in health promotion and disease monitoring. *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, no 10, p. 986.