

pdftitle=\_\_\_\_\_ **Thème** \_\_\_\_\_

*Étude des modèles de mobilité dans RCSFs avec  
station(s) de base mobile(s)*

\_\_\_\_\_18pt ,pdfauthor=,pdfsubject=**Mémoire de Master**

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité

**M**odélisation **M**athématique et **E**valuation de **P**erformances des

**R**éseaux, pdfkeywords=rapport vos mots clés

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.Mira Béjaia

Faculté des Sciences Exactes

Département de Recherche Opérationnelle



Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité

Modélisation Mathématique et Evaluation de Performances des Réseaux

---

## Thème

---

*Étude des modèles de mobilité dans RCSFs avec  
station(s) de base mobile(s)*

---

Réalisé par :

*M<sup>elle</sup>* ACHOUI Thinhinane      *M<sup>elle</sup>* ABDELKADER Lydia

Devant le jury composé de :

Président	OUYAHIA Samira	M.C.B	U. A. Mira, Béjaïa
Examinatrice	ZIDANI Faroudja	M.A.A	U. A. Mira, Béjaïa
Promotrice	BELKHIRI Louiza	M.A.B	U. A. Mira, Béjaïa

---

# REMERCIEMENTS

*Grâce à Dieu vers lequel vont toutes les louanges, ce travail s'est accompli.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements envers toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de ce travail.*

*En particulier, nous exprimons notre gratitude à notre encadreur Mme Belkhir Louiza, ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.*

*Nous remercions aussi vivement Mme Ouyahia Samira pour son orientation et le soutien qu'elle nous a apporté.*

*Nous adressons également nos très sincères remerciements à Mme Zidani Faroudja, d'avoir accepté d'examiner notre mémoire et pour l'intérêt qu'elle a bien voulu porter à ce travail.*

*Un grand merci aux membres de ma famille pour leurs présences, leurs préoccupations et leurs soucis qu'ils se fassent pour nous, leur encouragement et leur suivi avec patience du déroulement de ce travail.*

---

# DÉDICACES

Je remercie en premier lieu le bon Dieu qui m'a fait venir dans ce monde.

Je dédie ce mémoire à tous ceux qui me sont chers et pour tout l'amour qu'ils me portent :  
Ma plus profonde gratitude et tout mon amour je les adresse à mes chers parents, qui ont su me faire confiance et me soutenir en toutes circonstances.

À mon très cher frère Mahmoud pour avoir cru en moi et pour son soutien.

À toute ma famille mes oncles et leurs femmes, mes tentes paternelles et maternelles surtout Lyla, mes cousins et mes cousines.

À mes très cher amis surtout Sonia, Thiziri, Lydia et ma binôme Tinhinane. je leurs souhaite à tous beaucoup de réussite.

À mon chère fiancé Nadir qui ma encouragé et soutenue durant toute cette période.

À tous ceux et celles qui m'ont aider d'une façon ou d'une autre dans la réalisation de ce travail.

Lydia Abdelkader

---

# DÉDICACES

Je tiens tout d'abord à remercier dieu le tout puissant, qui ma donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je dédie cet humble travail à :

**Mon père** *Khelaf* comme témoignage de ma reconnaissance pour ses efforts dont je serais toujours redevable et l'intérêt qu'il n'a jamais cessé de porter à mes études.

**Ma chère mère** *Hakima* adorée qui s'est sacrifiée pour mon éducation et ma réussite et de lui dire que tu as été pour moi ma meilleure école

**Mes frères** *Massi* je te souhaite un avenir meilleur plein de réussite, *Youba* Tu es et tu resteras mon petit frère adorable.

**Ma sœur** *Dihia* qui m'a toujours soutenue je te souhaite toute la réussite du monde.

**Ma grand-mère** *Taous* qui honore notre famille.

**Mes grand parents** qui ne sont plus parmi nous, que dieu vous accueil dans son vaste paradis.

**Tous les membres de ma famille** petits et grands surtout ma chère cousine *Bania*, mes tantes *Nabila*, *Kahina* et *Samia*.

**Mes chers ami(e)s** *Meziani Tinhinane* qui est ma meilleure amie sans oublier *Tiziri*, *Nassima*, *Ouisseem*, *Sara*, *Ravah*, *Hayet*, *Amina* et ma binôme *Lydia*

Pour conclure, un remerciement particulier pour mon cher fiancé *Farid* qui m'a encouragée, soutenue et ses précieux conseils qui m'ont servis dans ce mémoire.

Thinhinane Achoui

---

# RÉSUMÉ

L'exploitation de la mobilité pour les réseaux sans fils est devenue une issue importante et a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche que ça soit pour les réseaux adhoc, les réseaux méchés ainsi que les réseaux véhiculaires. Récemment, il ya une tendance à utiliser la mobilité pour alléger le trafic et équilibrer la charge afin d'améliorer la consommation énergétique dans les RCSF.

Dans un scénario de mobilité, les nœuds doivent garder trace de la dernière position de la station de base afin de lui délivrer les données capturées. Cependant, les changements topologiques affectent la consommation de l'énergie et devraient être contrôlés.

L'objectif principal de ce travail est l'élaboration d'une étude comparative des principaux mécanismes de collecte de données dans les RCSF à puits mobile(s). Le schéma de collecte doit alors prendre en considération plusieurs facteurs tels que le type de l'application, l'architecture du réseau, le mécanisme de détection du puits mobile, mode de délivrance des données...

**Mots clefs :** RCSF, puits mobiles, modèle de mobilité, collecte de données.

---

# ABSTRACT

Mobility management is one of the most important issues in wireless networks, and thus it has received extensive research efforts in different areas of wireless networks such as mobile ad hoc network (MANET), wireless mesh network (WMN), and vehicular ad hoc network (VANET). Recently, there is a trend to investigate mobility as a means of relieving traffic burden and enhancing energy efficiency in wireless sensor network (WSN).

In mobility scenarios, nodes need to keep track of the latest location of mobile sinks for data delivery. However, frequent propagation of sink topological updates undermines the energy conservation goal and therefore should be controlled.

In this work, we provide a comparative study of data collection/dissemination schemes in WSN using sink mobility. The scheme must take in account many factors as the application type, network architecture, sink detection mechanism, data reporting mode...

**Keywords** : WSN, sink mobility, mobility pattern, data collection.

---

# TABLE DES MATIÈRES

## Glossaire

Table des matières	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Introduction Générale	1
<b>1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 Définitions . . . . .	4
1.2.1 Capteur . . . . .	4
1.2.2 Nœud capteur . . . . .	5
1.2.3 Capteur intelligent . . . . .	5
1.2.4 Les réseaux de capteurs . . . . .	5
1.3 Architecture matérielle d'un nœud capteur . . . . .	6
1.3.1 Unité de captage . . . . .	6
1.3.2 Unité de traitement . . . . .	7
1.3.3 Unité de communication . . . . .	7
1.3.4 Unité d'énergie . . . . .	7
1.4 Classification des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	7
1.4.1 Selon le type d'application . . . . .	8

1.4.2	Selon le mode de communication . . . . .	10
1.4.3	Selon la mobilité . . . . .	12
1.4.4	Selon la capacité des nœuds dans le réseau . . . . .	13
1.5	Les domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	13
1.6	Communication dans les réseaux . . . . .	14
1.6.1	La pile protocolaire adaptée par les RCSF . . . . .	14
1.6.2	Les standards de communication pour les RCFS . . . . .	17
1.7	Facteurs et contraintes de conception d'un RCSF . . . . .	17
1.7.1	Contraintes conceptuelles . . . . .	17
1.7.2	Contraintes matérielles . . . . .	18
1.8	Conclusion . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Etude des modèles de mobilité de la station de base dans les RCSF</b>	<b>20</b>
2.1	Introduction . . . . .	20
2.2	Définitions . . . . .	21
2.2.1	Puits . . . . .	21
2.2.2	Clustering et cluster . . . . .	21
2.3	La mobilité dans les RCSF . . . . .	22
2.4	Architecture du RCSF mobile . . . . .	22
2.5	Pourquoi la mobilité du puits? . . . . .	24
2.6	Les avantages de la mobilité du puits . . . . .	24
2.7	Les enjeux liés à la mobilité . . . . .	25
2.8	Les modèles de mobilité du puits dans les réseaux de capteurs . . . . .	27
2.8.1	La mobilité aléatoire . . . . .	27
2.8.2	La mobilité prévisible . . . . .	27
2.8.3	La mobilité contrôlée . . . . .	27
2.9	Conclusion . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Les stratégies de collecte de données dans les RCSFs avec puits mobiles</b>	<b>29</b>
3.1	Introduction . . . . .	29
3.2	Classification des schémas de collecte de données . . . . .	30
3.2.1	Schémas basés sur la mobilité avec contrainte de chemin . . . . .	31
3.2.2	Schémas basés sur la mobilité sans contrainte de chemin . . . . .	37
3.2.3	Schémas de collecte de données basés sur la mobilité contrôlée . . . . .	42

3.3 Synthèse et commentaires . . . . . 48  
3.4 Conclusion . . . . . 55

**Conclusion Générale** . . . . . **56**

**Bibliographie** . . . . . **57**

---

# TABLE DES FIGURES

1.1	Architecture matérielle d'un nœud capteur . . . . .	6
1.2	Type d'application orientée-temps . . . . .	8
1.3	Type d'application orientée événement . . . . .	9
1.4	Type d'application orientées requêtes . . . . .	10
1.5	Type de comunication à un seul saut . . . . .	11
1.6	Type de comunication multi-sauts . . . . .	11
1.7	Type de comunication hiéararchisée . . . . .	12
1.8	Type de communication multi-saut entre les clusters head . . . . .	12
1.9	Quelques domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil . . . . .	14
1.10	Pile protocolaire pour les RCSFs . . . . .	15
2.1	Exemple de structure de clusters . . . . .	22
2.2	Architecture du RCSFs mobile . . . . .	23
3.1	Classification des schémas de collecte de données . . . . .	30
3.2	Structure d'une bande dans MESS . . . . .	31
3.3	Cercles virtuels et lignes droites . . . . .	32
3.4	Architecture du système . . . . .	34
3.5	(a) Topologie du réseau avec les paramètres de la radio par défaut ; (b) Topologie du réseau après réglage de la radio . . . . .	39
3.6	Traçage du puits mobile . . . . .	41
3.7	modèle d'arbre de dissemination de données dans SEAD . . . . .	42
3.8	Exemple de superposition graphique G0 pour la traversée du réseau [46] . . . . .	44
3.9	Modèle de mobilité basé sur plusieurs clusters heads [48] . . . . .	46

---

# LISTE DES TABLEAUX

3.1	Comparaison entre les schémas basés sur la mobilité avec containte de chemin .	51
3.2	Comparaison entre les schémas basés sur la mobilité sans containte de chemin .	52
3.3	Comparaison entre les schémas basés sur la mobilité contrôlée . . . . .	53

---

# GLOSSAIRE

<b>BS</b>	<b>B</b> ase <b>S</b> tation.
<b>CH</b>	<b>C</b> luster <b>H</b> ead.
<b>CMs</b>	<b>C</b> luster <b>M</b> embers.
<b>DAG</b>	<b>D</b> irected <b>A</b> cyclic <b>G</b> ragh
<b>DDRP</b>	<b>D</b> ata <b>D</b> riven <b>R</b> outing <b>P</b> rotocol
<b>GMRF</b>	<b>G</b> reedy <b>M</b> aximum <b>R</b> outing <b>E</b> nergy
<b>IA</b>	<b>I</b> ntermdiate <b>A</b> gent
<b>ID</b>	<b>I</b> dentifiant
<b>IN</b>	<b>I</b> ntermediate <b>N</b> avigators
<b>MAC</b>	<b>M</b> edia <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol
<b>MDH</b>	<b>M</b> obile <b>D</b> ata <b>H</b> arvest
<b>MESS</b>	<b>M</b> ultiple <b>E</b> nhanced <b>S</b> pecified deployed <b>S</b> ub-sinks
<b>MS</b>	<b>M</b> obile <b>S</b> ink
<b>NA</b>	<b>N</b> avigators <b>A</b> gents
<b>NADC</b>	<b>N</b> etwork <b>A</b> ssisted <b>D</b> ata <b>C</b> ollection
<b>OSI</b>	<b>O</b> pen <b>S</b> ystem <b>I</b> nterconnection
<b>PA</b>	<b>P</b> rimary <b>A</b> gent
<b>RCSF</b>	<b>R</b> éseaux de <b>C</b> apteur <b>S</b> ans <b>F</b> il
<b>RPL</b>	<b>R</b> outing <b>P</b> rotocol <b>L</b> ow
<b>SEAD</b>	<b>S</b> calable <b>E</b> nergy <b>A</b> synchronous <b>D</b> issemination
<b>TDMA</b>	<b>T</b> ime <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiple <b>A</b> ccess
<b>VCCSR</b>	<b>V</b> irtual <b>C</b> ircle <b>C</b> ombined <b>S</b> traight <b>R</b> outing
<b>VS</b>	<b>V</b> ice <b>S</b> ink

WhiSper Wireless HighSpeedRouting

WSNs Wireless SensorsNetworks

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le besoin effréné d'informations et l'évolution rapide de la micro-électronique et des technologies sans fil, ont permis la création de petits appareils électroniques avec un coût très réduit (*ressources limitées*), capables de collecter et de traiter l'information d'une manière autonome et flexible. Ces appareils peuvent être interconnectés et déployés à grande échelle, donnant naissance à un nouveau type de réseaux nommé réseau de capteurs sans fil (*RCSF*). Le développement des RCSFs était originalement motivé par les applications militaires (*surveillance des champs de bataille, localisation de l'ennemie...*). Néanmoins, leurs performances remarquables en termes de fiabilité et de faible coût ont permis de proliférer leur utilisation dans le domaine d'application civil (*surveillance d'environnement, l'industrie, la domotique, la santé...*).

L'économie d'énergie représente l'un des grands défis à soulever pour le bon fonctionnement des réseaux de capteurs. En effet, les nœuds capteurs sont généralement alimentés au moyen d'une petite batterie limitée en puissance, et le remplacement de celle-ci est une tâche très difficile voire impossible. Par conséquent, l'épuisement des réserves d'énergie des nœuds capteurs implique la mise hors service du réseau tout entier. Dans cet axe, plusieurs travaux de recherche visent à prolonger la durée de vie du réseau. La plupart de ces travaux s'intéressent généralement à la couche réseau et la sous-couche MAC ou les deux conjointement.

Les RCSF sont conçus pour fonctionner en groupe et coopérer afin de transmettre les données collectées à un point central appelé station de base ou puits (*sink*). La station de base est le seul lien avec le monde extérieur et dispose de plus de ressources par rapport aux nœuds capteurs. Cette nature coopérative des nœuds capteurs est à l'origine du problème des nœuds chauds (*hotspot nodes*) qui sont les voisins à un saut du puits statique. En effet, un nœud

transmet non seulement ses propres données mais joue également le rôle de relai dans une communication multi-sauts vers le puits statique. Ces nœuds épuisent alors leur énergie plus rapidement que les autres causant ainsi une fracturation du réseau.

La mobilité du puits est une approche intéressante qui peut optimiser la durée de vie du réseau. En effet, elle apporte une solution au problème des nœuds chauds. Ainsi, rendre le puits mobile permet de changer périodiquement ces points chauds et obtenir un meilleur équilibrage de charge entre les différents nœuds du réseau.

La mobilité présente d'autres avantages tels que l'amélioration de la couverture et de la sécurité du réseau. Néanmoins, elle relève plusieurs enjeux aux chercheurs. En effet, une solution de mobilité doit répondre aux questions suivantes :

- Quand ? (le temps de passage, la durée du séjour, la durée d'une tournée) ;
- Où ? (point de migration, point d'arrêt, direction, trajectoire...);
- Comment ? (mécanisme de collecte de données) ;
- Quoi ? (quels sont les paramètres réseau à prendre en compte dans la solution).

Ce travail s'inscrit dans ce contexte et vise principalement à établir un état de l'art étendu sur les modèles de mobilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fils à station(s) de base mobile(s) ainsi qu'une étude comparative des différents schémas de collecte de données associés.

Le mémoire est organisé comme suit :

- Dans le chapitre 1 intitulé ” **Généralités sur les RCSF** ”, nous donnons une vue générale sur les réseaux de capteurs sans fils, leurs caractéristiques spécifiques, leurs types d'application...

- Dans le chapitre 2 intitulé ” **Modèles de mobilité pour les RSCF** ”, nous introduisant en premier lieu la notion de mobilité, ses motivations et les challenges qu'elle relève. En deuxième lieu, nous définissons les principaux modèles de mobilité existants dans la littérature.

- Le chapitre 3 nommé ” **Les stratégies de collecte de données dans les RCSF avec puits mobiles** ” expose plusieurs stratégies de collecte et de transmission des données des nœuds sources vers le(s) puits mobiles(s). Une étude comparative de ces solutions selon plu-

sieurs paramètres (architecture du réseau, type de l'application, nombre de puits, messages de contrôle et contrainte de chemin...) sera établie.

-Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

---

---

# CHAPITRE 1

---

## GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

### 1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs ou Wireless Sensor Networks (WSNs)) sont devenus de plus en plus populaires grâce aux grandes avancées technologiques. Les milieux scientifiques et industriels leur prêtent de plus en plus d'attention du fait de leurs riches applications dans les domaines : médical, commercial et militaire. Ils possèdent des capacités particulières comme l'auto-organisation, rapidité de déploiement, tolérance aux erreurs et leur faible coût.

Les RCSFs sont composés d'un nombre potentiellement très grand de capteurs qui communiquent selon un modèle de communication "sources multiples - destination unique", déployés dans la zone à couvrir.

Notre objectif dans ce chapitre est de donner une vue générale sur les réseaux de capteurs, leurs caractéristiques spécifiques, leurs types d'applications et les différentes architectures.

### 1.2 Définitions

#### 1.2.1 Capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.), et de la communiquer à un centre

de contrôle via une station de base [1].

### 1.2.2 Nœud capteur

C'est un nœud dans un réseau de capteurs qui est capable de réaliser certains traitements, comme la collecte d'informations sensorielles et la communication avec d'autres nœuds connectés sur le réseau. Il est principalement composé d'un processeur, d'une mémoire, d'un émetteur/récepteur radio, d'un ensemble de capteurs et d'une pile (source d'énergie) [2].

### 1.2.3 Capteur intelligent

Le terme intelligent (smart sensor ou intelligent sensor) a été utilisé dans l'industrie des capteurs pour désigner des capteurs qui ne fournissent pas seulement des mesures, mais aussi une fonctionnalité aux mesures spécifiques[3]. Par rapport à un capteur classique, un capteur intelligent intègre de nombreux éléments électroniques additionnels, ainsi que des unités programmables et des aspects logiciels nécessaires au traitement des données, aux calculs et à la communication numérique[4]. Il est donc caractérisé par sa capacité à effectuer une collecte des mesures [3], les traiter et à les communiquer au monde extérieur.

### 1.2.4 Les réseaux de capteurs

Un réseau de capteurs sans fil est un réseau avec un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée " champ de captage " correspondant au terrain d'intérêt pour le phénomène capté[5].

Dans les télécommunications, les médiums de transmission peuvent être classés selon deux types de supports différents : filaire et sans fil. Les supports filaires sont les câbles électriques, des fibres optiques ; tandis que les supports sans fil sont les ondes radio, les ondes lumineuses, magnétiques d'où les deux types de réseaux de capteurs filaires et sans fils.

Tel réseau ne se limite pas à un domaine particulier mais il peut s'adresser à une diversité de secteurs comme la biologie, la chimie, l'environnement, ainsi que la surveillance sismique et même la télésurveillance personnelle...[6]

## 1.3 Architecture matérielle d'un nœud capteur

Selon le type d'application, il existe une variété de capteurs qui peuvent être regroupés en trois classes : Les capteurs optiques, les capteurs thermiques et les capteurs mécaniques. Une architecture matérielle applicable à la plupart des capteurs intelligents est proposée sur la figure 1.1 [7]. Un capteur contient quatre unités de base : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission et l'unité de contrôle d'énergie. Selon le domaine d'application, des modules supplémentaires peuvent être ajoutés tel qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire). Quelques micro-capteurs plus volumineux, sont dotés d'un système mobilisateur chargé de les déplacer en cas de nécessité.

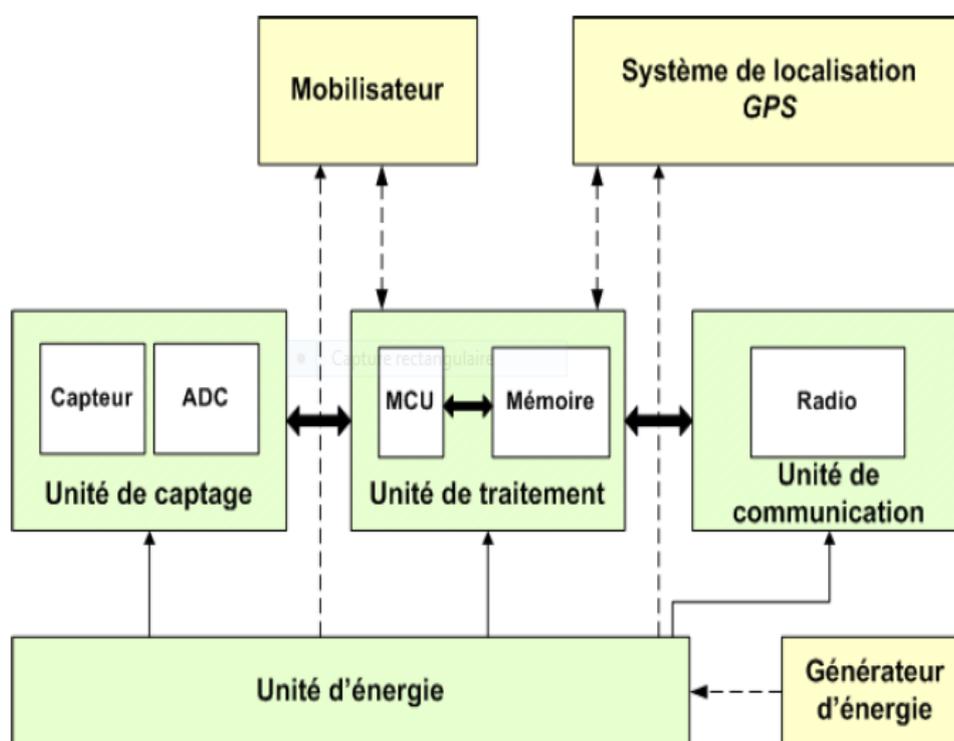


FIGURE 1.1 – Architecture matérielle d'un nœud capteur

### 1.3.1 Unité de captage

C'est l'unité qui est chargée de capter des grandeurs physiques (Chaleur, humidité, vibrations, rayonnement, etc..) et de les transformer en grandeurs numériques (un signal électrique). Cette unité peut incorporer de un jusqu'à plusieurs capteurs plus une unité ADC (Analog to Digital Converters). Le rôle de cette dernière consiste à convertir le signal analogique produit par les capteurs, qui est basé sur les données échantillonnées, en un signal numérique compré-

hensible par l'unité de traitement [7].

### 1.3.2 Unité de traitement

L'unité de traitement peut être considérée comme l'organe intelligent du capteur. Elle inclut un processeur qui est généralement associé à une petite unité de stockage. Elle gère des programmes et des logiciels, stocke en mémoire les paramètres métrologiques et fonctionnels (dont la datation est permise par l'horloge interne) et elle assure les traitements des données reçues de l'unité de captage. Généralement l'unité de traitement commande les autres unités [8]. Les processeurs utilisés dans les réseaux de capteurs sont à faible consommation d'énergie et à faible fréquence. Moins de 10 Mhz pour une consommation de 1 mW. Aussi la mémoire de stockage est très limitée, elle est de l'ordre de 10Ko de RAM pour les données et 10 Ko de ROM pour les programmes. Cette mémoire consomme la majeure partie de l'énergie de l'unité du traitement. Dans la plus part des cas on lui adjoint, une mémoire flash moins coûteuse en termes d'énergie [9].

### 1.3.3 Unité de communication

Cette unité assure la connexion entre les nœuds du réseau. Un module radio (émetteur/récepteur) est intégré à cette unité qui permet la communication entre différents nœuds du réseau. La communication peut être de type optique ou radio fréquence [10]. Elle est responsable de la transmission-réception des données captées et traitées via un canal de communication sans fil. Le module radio c'est le module qui consomme le plus d'énergie.

### 1.3.4 Unité d'énergie

Un capteur est muni d'une source d'énergie, généralement une batterie [11], pour alimenter tous ses composants. Les batteries sont utilisées soit rechargeables ou non. Souvent, dans les environnements sensibles, il est impossible de recharger ou de changer une batterie, pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et donc d'un réseau de capteurs.

## 1.4 Classification des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sont des réseaux orientés application. De ce fait, leurs caractéristiques se diffèrent d'un domaine d'application à un autre. Ils se distinguent par le type

d'application pour laquelle ils sont conçus, le mode de communication [12], la mobilité, et selon la capacité des nœuds dans le réseau [12].

### 1.4.1 Selon le type d'application

Le mode de collecte et de livraison des données dans les réseaux de capteurs dépend étroitement du type d'application. Ainsi, les applications des réseaux de capteurs sans fil RCSF peuvent être classés en quatre types d'applications : orientées temps (time driven), orientées événements (event driven), orientées requêtes (query driven) et hybrides [7].

#### – Applications orientées-temps

Dans ce type d'application, les capteurs font leur échantillonnage d'une manière périodique dans des intervalles de temps réguliers. Ensuite, ils envoient ces données captées à la station de base périodiquement, comme le montre la figure 1.2. Un exemple d'utilisation de ce type de réseau est la collecte des données environnementales (agriculture, étude de phénomène naturel...).

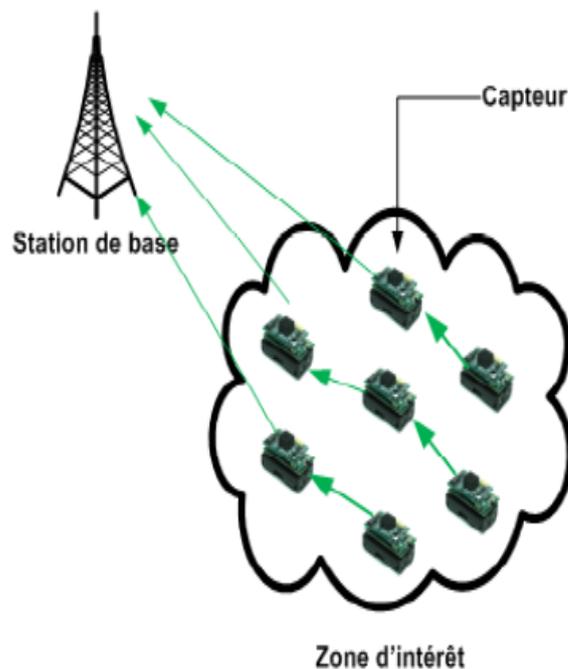


FIGURE 1.2 – Type d'application orientée-temps

#### – Applications orientées événement

Dans ce type d'applications, les capteurs envoient les données à la station de base seulement si un événement spécial se produit. A titre d'exemple, l'événement peut être la détection de la

fumée, voir la figure 1.3. Ce type de réseau peut être appliqué dans différents domaines tels que la surveillance médicale (surveillance de taux de glycémie dans le sang), le contrôle d'édifice (les barrages, les voies des chemins de fer...), la surveillance militaire, etc.

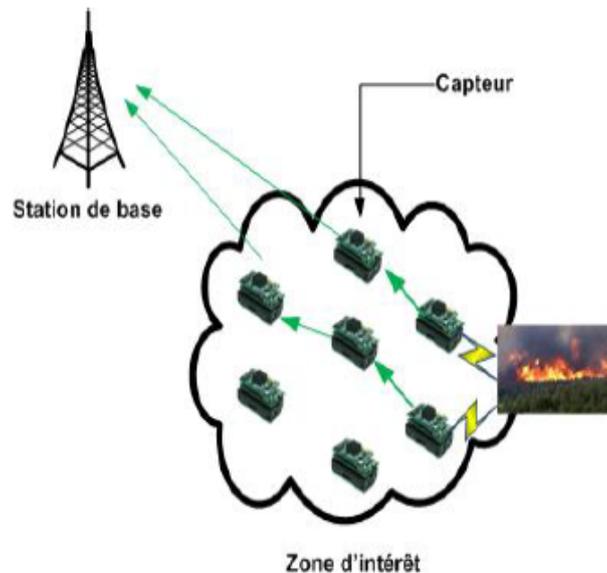


FIGURE 1.3 – Type d'application orientée événement

#### – Applications orientées requêtes

Dans les applications orientées requêtes, les capteurs font un échantillonnage à la demande de la station de base. Lorsqu'un capteur reçoit une requête de la part de la station de base, il déclenche la collecte de données. Après, il envoie ces données collectées à la station de base, figure 1.4. Cette catégorie de réseau est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur (demande des informations sur une région bien précise). Dans ce type de réseau, la topologie et la position des nœuds doivent être connues.

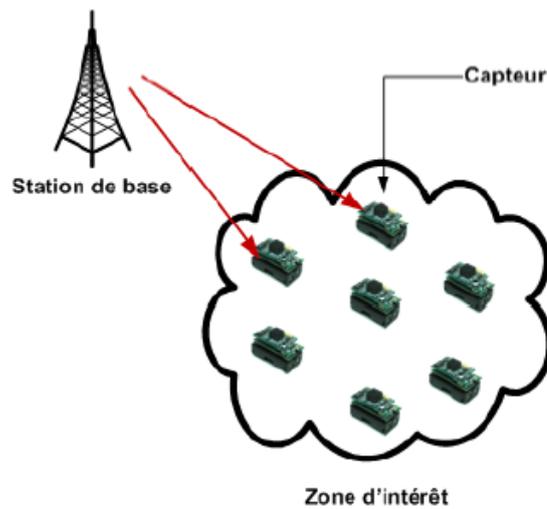


FIGURE 1.4 – Type d'application orientées requêtes

#### – Application hybride

Le type d'application hybride est une combinaison entre les trois types d'applications précédemment décrites. Par exemple, dans un réseau conçu pour le suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau de surveillance (time-driven) et un réseau de collecte de données par événements (event-driven). Par exemple, pendant les longues périodes d'inactivité des capteurs et lorsqu'aucun objet n'est présent, le réseau peut assurer une fonction de surveillance.

### 1.4.2 Selon le mode de communication

Le mode de communication utilisé dans le réseau de capteurs dépend du type d'application et des techniques utilisées pour faire acheminer l'information des capteurs à la station de base. On distingue dans cette classification trois types de communications : les réseaux de capteurs à un seul-saut (single-hop WSN), les réseaux de capteurs multi-sauts (multi-hop WSN) et les réseaux de capteurs hiérarchiques.

#### – les réseaux de capteurs à un seul-saut

Dans les réseaux de capteurs à un seul-saut, les nœuds capteurs envoient les données collectées directement à la station de base sans passer par des nœuds intermédiaires. Dans ce type de réseau, les nœuds envoient leurs données en utilisant une forte puissance comme illustré dans la figure 1.5.

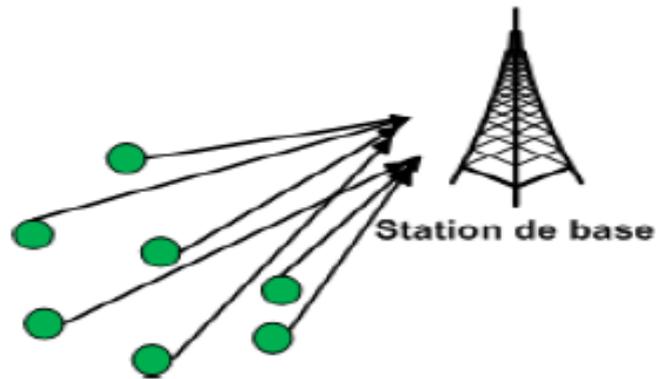


FIGURE 1.5 – Type de communication à un seul saut

– les réseaux de capteurs multi-sauts

Dans les réseaux de capteurs multi-sauts, un nœud capteur envoie ses données à la station de base par l'intermédiaire de ses nœuds voisins en utilisant une petite puissance de transmission. La figure 1.6 illustre un exemple sur ce type de communication. Ce type de réseau est appliqué dans plusieurs domaines d'application, mais il reste difficile à mettre en œuvre [13].

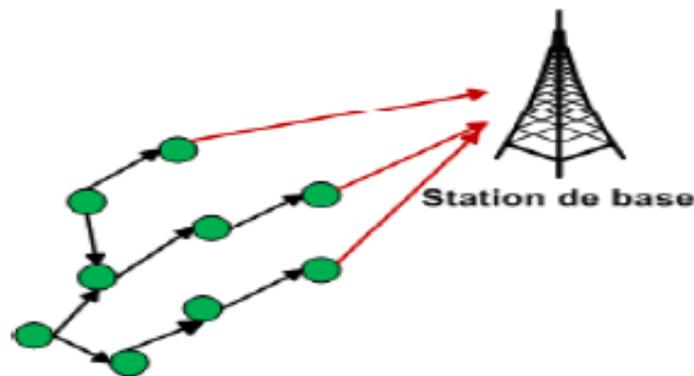


FIGURE 1.6 – Type de communication multi-sauts

– les réseaux de capteurs hiérarchiques

Dans les réseaux de capteurs hiérarchisés, la zone d'observation est divisée en clusters. Un clusterhead est élu pour chaque cluster. Ce dernier s'occupe de récupérer les informations auprès des capteurs dans son cluster et de les transmettre directement à la station de base voir la figure 1.7 ou via un mode multi-saut entre les clusters head voir la figure 1.8 .

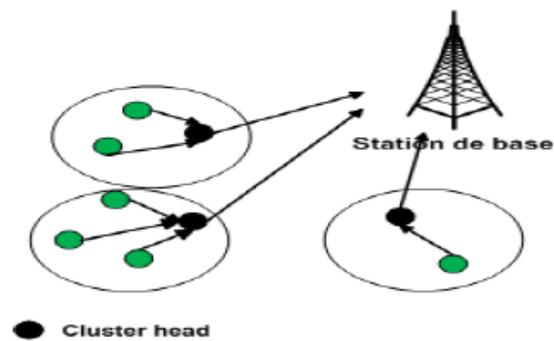


FIGURE 1.7 – Type de communication hiérarchisée

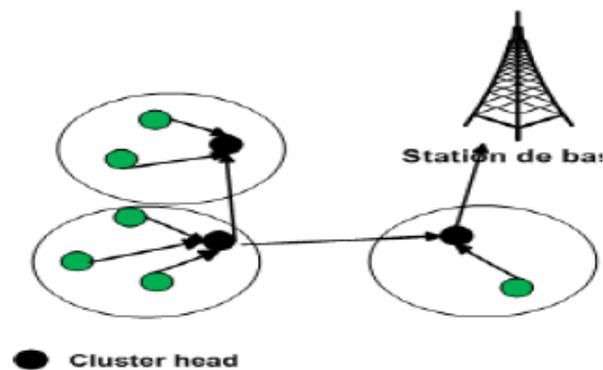


FIGURE 1.8 – Type de communication multi-saut entre les clusters head

### 1.4.3 Selon la mobilité

Selon la mobilité des nœuds, on peut avoir deux grandes classes : les réseaux de capteurs statiques (static wireless sensor networks- WSNs) et les réseaux de capteurs mobiles (mobile wireless sensor networks- MWSNs). La plupart des domaines d'application existants utilisent des réseaux de capteurs statiques. Dans ce type de réseaux, tous les nœuds capteurs y compris la station de base sont statiques. Les réseaux de capteurs sans fil mobiles (MWSNs) peuvent être simplement définis comme un réseau de capteurs sans fil (WSN) dans lequel les nœuds capteurs sont mobiles. MWSNs sont un petit domaine de recherche émergent comparé à son prédécesseur, les réseaux de capteurs statiques [14]. MWSNs sont beaucoup plus polyvalents que les réseaux de capteurs statiques, car ils peuvent être déployés dans n'importe quel scénario et faire face aux changements rapides de la topologie. Le but de ce type de réseau est la plupart

du temps l'exploration des zones inaccessibles ou dangereuses.

#### 1.4.4 Selon la capacité des nœuds dans le réseau

Dans cette classification, on distingue deux catégories : les réseaux de capteurs homogènes et les réseaux de capteurs hétérogènes [13] .

Dans les réseaux de capteurs homogènes, tous les capteurs du réseau ont les mêmes caractéristiques. Ils ont les mêmes capacités du point de vue énergie, calcul et stockage. Tandis que dans les réseaux de capteurs hétérogènes, on trouve des capteurs sophistiqués qui ont plus de capacité en termes d'énergie et de traitement. Les capteurs sophistiqués peuvent être utilisés pour exécuter les tâches les plus complexes comme les coordinateurs et les chefs des clusters, etc. De ce fait, l'utilisation de ces nœuds augmente la durée de vie du réseau. Cependant, il est difficile à mettre en œuvre du fait qu'au moins chaque type de nœuds du réseau aura un code (programme) propre à lui. Ce qui augmente le coût du développement.

### 1.5 Les domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil

La miniaturisation, le faible coût, l'absence de câblage sont une variété de caractéristiques des réseaux de capteurs qui ont permis à cette nouvelle génération de réseaux d'envahir plusieurs domaines d'applications. Parmi les domaines d'applications ou les réseaux de capteurs sans fil se révèlent très utiles et leur déploiement a une importance cruciale, on trouve le domaine militaire, le domaine environnemental, le domaine de la santé, le domaine écologique, les maisons intelligentes,...etc.

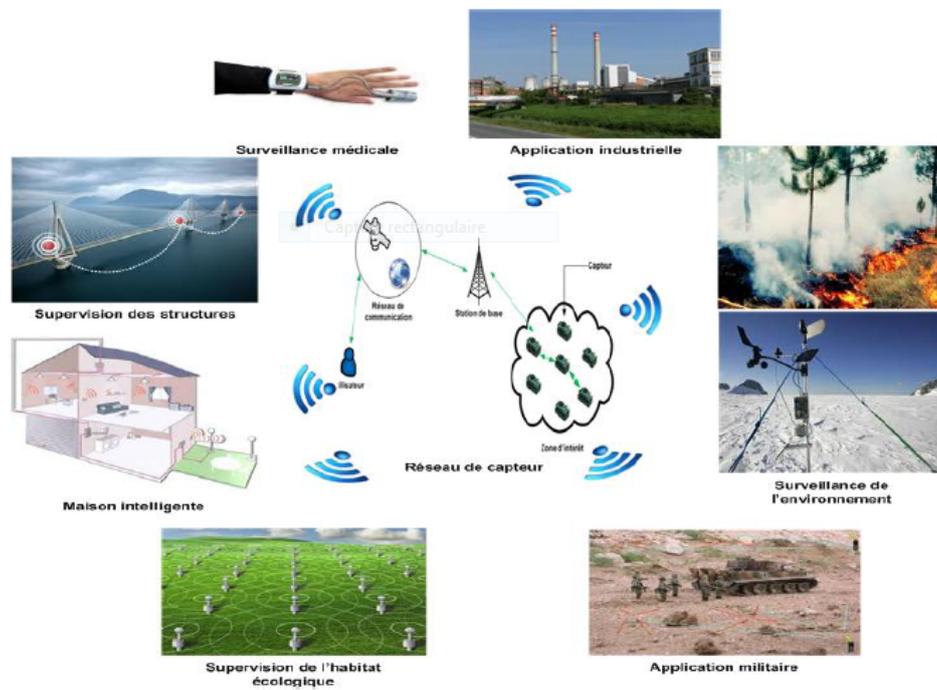


FIGURE 1.9 – Quelques domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil

## 1.6 Communication dans les réseaux

### 1.6.1 La pile protocolaire adaptée par les RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil imposent des contraintes supplémentaires aux protocoles de communication. Par conséquent, le modèle traditionnel en couches (modèle OSI), ne répond pas aux exigences de ce type particulier de réseaux. En effet, les RCSFs adoptent une version simplifiée du modèle OSI, à laquelle sont ajoutées de nouvelles couches afin de remédier aux contraintes et aux limitations imposées. Ainsi, le nouveau modèle se compose de 5 couches similaires à celles du modèle OSI (physique, liaison, réseau, transport et application), et trois plans de gestion dédiés pour le contrôle d'énergie, de mobilité et des tâches particulières.

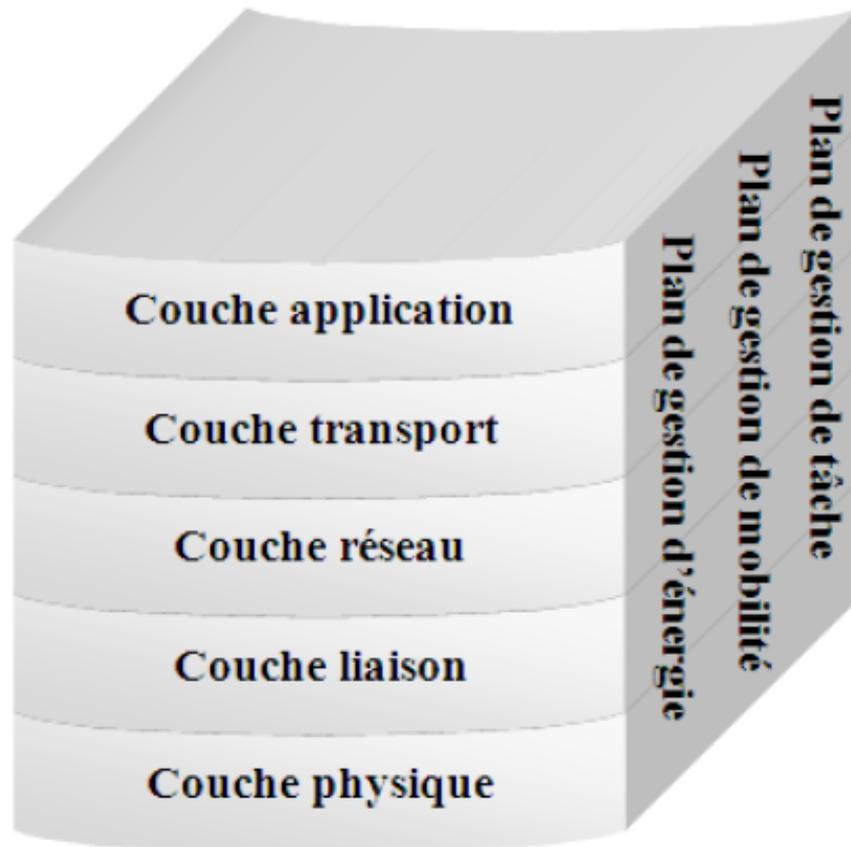


FIGURE 1.10 – Pile protocolaire pour les RCSFs

- **La couche physique :**

Comme celle du modèle OSI, cette couche est responsable de la modulation, la détection du signal et la sélection des fréquences porteuses.

- **La couche liaison :**

Cette couche est chargée du contrôle d'erreurs, du multiplexage des flux de données, et le contrôle d'accès au média de transmission.

- **La couche réseau :**

L'objectif de cette couche est de trouver des chemins de routage à faible coût d'énergie pour transmettre les données captées vers la station de base. Ainsi, les protocoles de cette couche doivent toujours prendre en compte les limitations en ressources des nœuds capteurs.

- **La couche transport :**

Son rôle est le contrôle du flux, le découpage, l'ordonnancement et le transport des paquets de données, et la gestion des erreurs de transmission.

- **La couche application :**

Afin de fournir une interface d'interaction avec l'utilisateur humain, les nœuds capteurs peuvent être dotés d'une couche application, dont le rôle est d'implémenter l'ensemble d'applications et de logiciels d'interaction.

- **Le plan de gestion d'énergie :**

Les nœuds capteurs sont sévèrement limités en ressources d'énergie, qui influence directement sur la durée de vie du réseau. Ainsi, le plan de gestion d'énergie doit fournir des mécanismes de gestion efficaces pour réduire le degré de consommation d'énergie, et éliminer les sources de gaspillage de celle-ci.

- **Le plan de gestion de mobilité :**

Ce plan est responsable du contrôle du mouvement des nœuds capteurs dans le cas où ils sont mobiles. Il peut par exemple enregistrer les trajectoires d'un nœud capteur afin de l'aider à se localiser.

- **Le plan de gestion de tâche :**

Dans un réseau de capteurs, les nœuds peuvent effectuer des tâches qui se différencient en termes de consommation de ressources. Ainsi, un plan de gestion de tâche est souvent nécessaire afin de répartir d'une manière équitable les tâches sur les nœuds capteurs, et offrir ainsi une gestion efficace des ressources disponibles.

## 1.6.2 Les standards de communication pour les RCFS

Il y a une multitude de normes sans fil comme le Wi-Fi (le standard IEEE802.11)[13] et le WiMax (le standard IEEE802.16) qui s'adressent au transport des données à hauts débits. Certains dispositifs comme les capteurs n'ont pas besoin d'une largeur de bande très élevée, mais plutôt d'un temps de latence faible ainsi qu'une consommation d'énergie très basse, pour une longue durée de vie de batterie. D'où la nécessité de concevoir d'autres normes sans fil capable de répondre à ces exigences. Parmi les standards les plus aptes à être exploités dans les RCFS se retrouvent les standards Bluetooth et ZigBee.

## 1.7 Facteurs et contraintes de conception d'un RCFS

La conception et la mise en place des RCFS sont influencées par plusieurs contraintes qui peuvent être des contraintes conceptuelles ou matérielles. Ces facteurs importants servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les réseaux de capteur ; ils sont considérés également comme métriques de comparaison de performances entre les différents travaux dans le domaine.

### 1.7.1 Contraintes conceptuelles

#### 1. la tolérance aux pannes

La défaillance de certains nœuds capteurs dans un réseau de capteurs sans fil peut être causée par plusieurs facteurs, notamment l'épuisement d'énergie, l'endommagement physique, ou aussi à cause des interférences liées à l'environnement. La tolérance aux pannes désigne l'habileté du réseau à maintenir ses fonctionnalités malgré les interruptions provoquées par la panne des capteurs. Elle vise à minimiser l'influence de ces défaillances sur le fonctionnement global du réseau [16].

#### 2. Le passage à l'échelle (l'extensibilité)

L'une des caractéristiques des RCFS est qu'ils peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à des milliers de capteurs. Les nouveaux schémas doivent pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre élevé de capteurs. Ils doivent aussi exploiter la nature fortement dense des réseaux de capteurs.

#### 3. Le coût de production

Le coût de production d'un seul micro-capteur est très important pour l'évaluation du coût global du réseau, si ce dernier est supérieur à celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classiques, l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas rentable. Par conséquent, réduire le coût de production jusqu'à moins de 1\$ par nœud est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans fil [15].

#### 4. Environnement

Les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement : forte chaleur, pluie, humidité...

#### 5. Média de transmission

Les nœuds communicants sont reliés avec un lien sans fil. Ce lien peut être réalisé par radio et signal infrarouge.

#### 6. La Consommation énergétique

Les nœuds capteurs, étant des dispositifs microélectroniques, peuvent être équipés seulement d'une batterie faible en énergie ( $< 0.5$  Ah, 1.2V). Dans la plupart des applications, cette batterie est irremplaçable. La durée de vie du nœud capteur dépend fortement de la durée de vie de sa batterie. Cette énergie est consommée par les différentes unités du capteur afin de réaliser les tâches de collecte de données (captage), le traitement de ces dernières et leurs communications [17]. La transmission de données est la tâche qui consomme le plus d'énergie [18]. Par ailleurs, la plupart des applications des réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque nœud joue à la fois un rôle d'initiateur de données et de routeur également, la défaillance d'un certain nombre de nœuds entraîne un changement significatif sur la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un routage de paquets différent et une réorganisation totale du réseau. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs.

### 1.7.2 Contraintes matérielles

Parmi les contraintes matérielles liées aux RCSFs, on peut citer :

#### 1. Dimension

La taille réduite des capteurs peut présenter de nombreux avantages, elle permet un déploiement flexible et simple du réseau. Cependant, la puissance des batteries utilisées pour alimenter les nœuds capteurs est limitée, par la petite taille de ces derniers.

## 2. Puissance de calcul

Les processeurs des réseaux de capteurs sont différents de ceux d'une machine classique. Car, ils utilisent souvent des microcontrôleurs de faibles fréquences.

## 1.8 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons essayé de mettre le point sur l'architecture des RCSFs, ainsi que leurs principaux domaines d'application et leur contraintes de conception. Parmi ces contraintes, nous avons vu les contraintes matérielles et conceptuelles. La compréhension de ces concepts est nécessaire pour les concepteurs des protocoles et applications destinés aux réseaux de capteurs sans fil.

---

---

## CHAPITRE 2

---

# ETUDE DES MODÈLES DE MOBILITÉ DE LA STATION DE BASE DANS LES RCSF

### 2.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sont des réseaux radio multisauts composés d'une multitude de nœuds, ou capteurs, déployés aléatoirement sur une zone d'intérêt. Ces capteurs présentent des ressources matérielles limitées en termes de calcul, de stockage et d'énergie. Les capteurs collectent des données de l'environnement qui les entoure, et les envoient vers une station de base, appelé également puits. La concentration du trafic de données vers le puits provoque l'épuisement des nœuds à proximité de ce dernier. Pour remédier au problème de perte de connectivité suite à l'épuisement des nœuds capteurs relais qui y mènent, l'utilisation des puits mobiles est proposée. Les puits mobiles offrent un équilibrage de charge implicite, en contribuant à une consommation d'énergie mieux répartie à travers le réseau. Dans ce chapitre, nous allons présenter la mobilité dans les RCSF, le but des puits mobiles, ainsi que les avantages et les déficits liés à leur prise en charge. Enfin, nous aborderons les modèles de mobilité dans les RCSF.

## 2.2 Définitions

### 2.2.1 Puits

C'est un nœud particulier du réseau. Il est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds du réseau. Il doit être toujours actif puisque l'arrivée des informations est aléatoire. C'est pourquoi son énergie doit être illimitée. Dans un RCSF plus ou moins large et à charge peu élevée, nous pouvons trouver deux puits ou plus pour alléger la charge[19].

### 2.2.2 Clustering et cluster

Un cluster est un sous-ensemble de nœuds connexe, et la structuration ou clustering est le processus de regroupement des nœuds en clusters disjoints. Généralement et comme le montre la figure 2.1, les clusters comportent trois types de nœuds :

- Un nœud particulier appelé chef de cluster ou "cluster-Head" (CH). Ce dernier permet de coordonner les membres de son cluster, d'agréger et /ou de traiter les données collectées et de les transmettre au collecteur de données. Le chef de cluster est choisi pour jouer ce rôle soit d'une manière déterministe (chef de cluster prédéfini) ou d'une manière aléatoire (chef de cluster élu parmi les nœuds du réseau selon une métrique bien particulière ou une combinaison de métriques).
- Un nœud passerelle ou "gateway" qui possède des liens inter-clusters et peut donc accéder à des clusters voisins et acheminer les données entre eux.
- Enfin un nœud ordinaire ne possédant pas de liens avec les autres clusters et quand il s'attache à un chef de cluster il en devient membre.

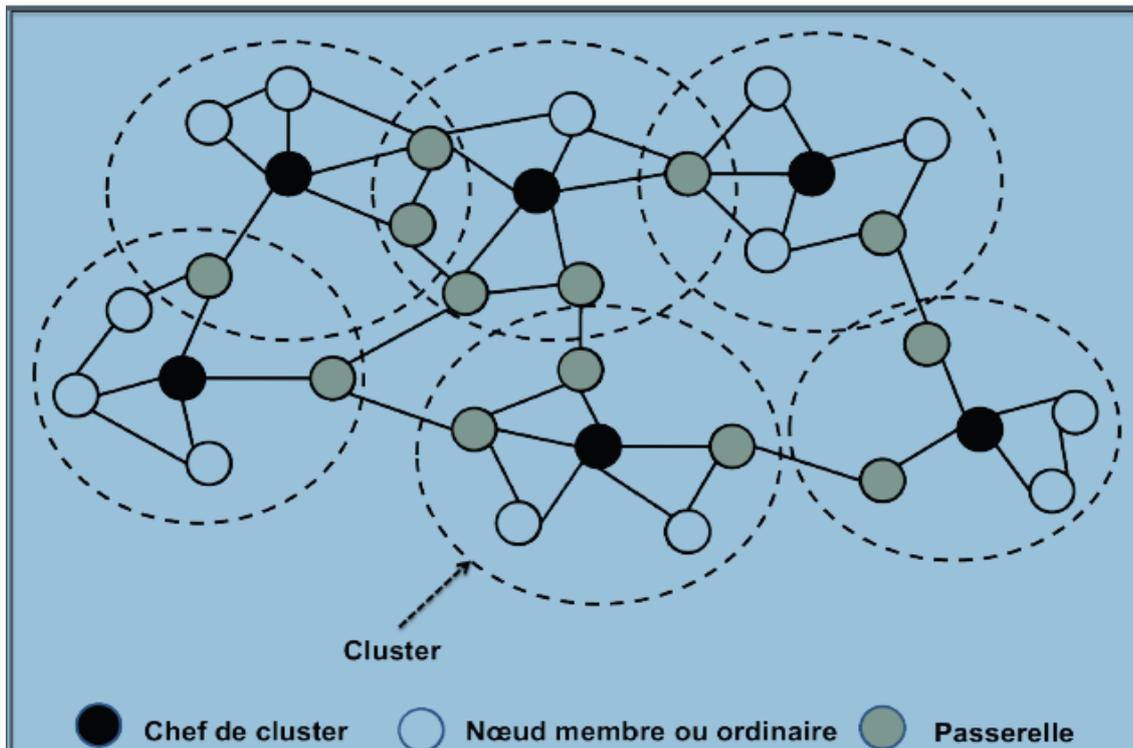


FIGURE 2.1 – Exemple de structure de clusters

## 2.3 La mobilité dans les RCSF

La mobilité est une caractéristique importante dans les réseaux de capteurs sans fil. Elle peut être considérée au niveau des nœuds capteurs destinés au captage ou au niveau des collecteurs, ou encore au niveau des puits. Lorsque la mobilité est trop rapide, la détection des voisins et la reconfiguration du réseau exigent habituellement un nombre important de messages de contrôle de la topologie et donc une consommation d'énergie importante.

## 2.4 Architecture du RCSF mobile

L'architecture du RCSF mobile est différente de celle d'un RCSF statique, le puits continue à se déplacer autour ou à l'intérieur du champ de détection pour la collecte efficace de données. Une référence de l'architecture du RCSF mobile est représentée sur la figure 2.2.

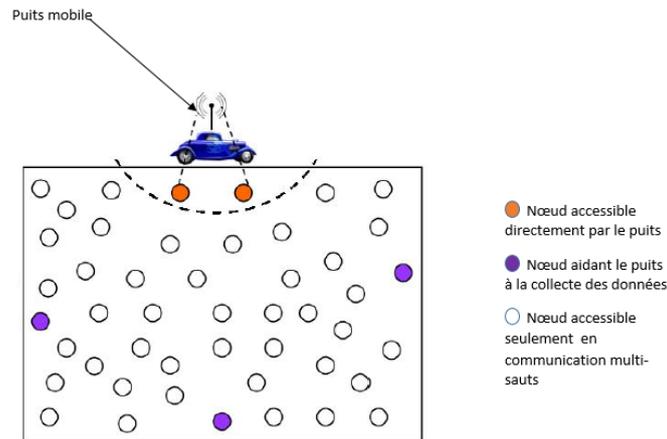


FIGURE 2.2 – Architecture du RCSFs mobile

Les principaux composants d'un RCSF mobile sont donnés comme suit :

*Nœuds réguliers* : sont les nœuds capteurs ordinaires qui sont déployés dans le champ de capteur pour détecter un phénomène d'intérêt. Lors de la détection des événements, ces nœuds diffusent leurs données de manière coopérative vers un puits mobile. En fonction de leur emplacement dans le champ de capture, les nœuds pourraient fonctionner comme des relais transmettant ainsi d'autres données vers un puits mobile.

*Puits mobile* : Selon le scénario d'application, ça pourrait être un ou plusieurs puits mobiles qui se déplacent autour ou à l'intérieur du champ de capteur pour la collecte de données. De tels dispositifs sont considérés comme des dispositifs sans contrainte en termes de leurs ressources. Le puits mobile peut être un nœud capteur fixé à un être humain, voiture, animal ou un robot.

*(Facultatif) Assistants du puits* : Dans certaines applications, des nœuds spéciaux sont déployés dans des positions stratégiques qui fournissent une assistance au puits dans la collecte des données. Ces appareils sont également considérés riches en énergie. Dans le cas où ces assistants sont statiques, ils deviennent des collecteurs de données intermédiaires pour les nœuds capteurs et puis transmettent les données collectées au puits mobile dès son arrivée. Dans le cas de la mobilité, ils sont destinés à assurer une couverture près du champ de capture pour les services de communication en temps réel dans certaines applications[21].

## 2.5 Pourquoi la mobilité du puits ?

Le puits a pour principal objectif la collecte des différentes données générées par les capteurs. Plusieurs travaux considèrent que ce puits est statique ou immobile. Cependant, cette hypothèse n'est pas toujours réalisable notamment pour des raisons de sécurité ou de déploiement. De plus, la mobilité du puits permet d'augmenter la durée de vie du réseau en évitant de surcharger les nœuds présents dans le voisinage du puits [20]. Plusieurs raisons expliquent l'intérêt de l'utilisation des puits mobiles, par rapport aux puits statiques, notamment pour l'amélioration des performances réseau.

## 2.6 Les avantages de la mobilité du puits

Dans presque toutes les applications des RCSF, le puits est considéré comme une entité sans contrainte en termes de ressources (réserve d'énergie, de puissance de traitement, capacité de communication, etc.). De même, dans plusieurs applications des réseaux de capteurs, la mobilité des puits peut être réalisée par la fixation d'un dispositif récepteur vers une entité mobile comme humain, animal, robot, ou d'un véhicule qui peut se déplacer à l'intérieur du champ de détection pour la collection des données. Des économies d'énergie considérables peuvent être obtenues par le déploiement d'un puits mobile dans le champ de captage.

Kinalis et al [22] ont identifié plusieurs avantages potentiels de la mobilité du puits qui sont décrits comme suit :

- Augmentation de la durée de vie du capteur :

En exploitant la mobilité du puits, non seulement le problème d'énergie qui est réduit, mais ceci améliore également la durée de vie des nœuds. Les nœuds capteurs sont considérés comme des dispositifs à contrainte d'énergie alors que le puits, étant externe au réseau, n'a pas de contraintes énergétiques. Étant donné que le module de communication est considéré comme le principal consommateur des réserves d'énergie d'un nœud, si le puits se rapproche de la source d'événement des nœuds, de plus grandes économies d'énergie pourraient être obtenues, ce qui limite la communication multi-saut.

- Amélioration de la couverture

Un puits mobile peut potentiellement couvrir les réseaux clairsemés en raison de sa fonction de mobilité. De même, le puits mobile peut également passer par les zones problématiques où il y a une obstruction dans le chemin de propagation telle que de gros rochers.

- Amélioration du débit et la fiabilité des données :

En exploitant la mobilité du puits, on peut également obtenir un meilleur débit et des données fiables. Si le puits se déplace vers la zone d'intérêt, il ne va pas seulement réduire le nombre de transmissions mais aussi réduire la probabilité d'erreurs de transmission et les risques de collisions. Minimiser les retransmissions améliore non seulement le débit du réseau, mais prolonge également sa durée de vie.

- Amélioration de la sécurité :

En exploitant la mobilité du puits, il est relativement difficile d'écouter les informations sur le réseau, de ce fait, le réseau est moins exposé aux menaces de sécurité. En outre, un adversaire peut obtenir les informations concernant uniquement une petite zone en raison du nombre réduit de transmissions multi-sauts. De même, les attaques possibles ciblant les nœuds capteurs de passerelle pour perturber le fonctionnement du réseau ne sont pas possibles en raison de la mobilité du puits, il n'y a pas de tels nœuds géo-stratégiques par lesquels les messages doivent toujours passer.

## 2.7 Les enjeux liés à la mobilité

La mobilité du puits soulève plusieurs défis lors de la conception et la mise en place d'un protocole de routage. N'importe quel protocole de routage conçu pour un RCSFs à puits mobile doit effectuer les opérations suivantes [23] :

- Informer les voisins sur la présence ou la rupture du lien avec le puits mobile.
- Propager des mises à jour topologiques du puits pour assurer la connectivité.
- Réduire les risques de perte de paquets tandis que le puits se déplace d'un point à un autre.

Cependant, ces opérations ne peuvent pas être prises d'une manière holistique car cela augmente considérablement la consommation d'énergie du nœud capteur pour chaque mouvement du puits mobile. Les éléments suivants sont les différents défis qui se posent en raison de la mobilité du puits [24] :

### – Détection de la présence du puits

D'abord la présence du puits doit être détectée par les nœuds capteurs qui sont dans sa portée de communication. La détection de la présence du puits est très influencée par la vitesse du puits mobile et les périodes d'activités des nœuds, puisque un nœud en mode veille ne sera pas en mesure de détecter la présence d'un puits mobile. De même la forte mobilité du puits introduit

un court temps de contact avec les nœuds capteurs qui provoque par conséquent un taux de perte de paquets élevé .

– **La gestion de la période d’activité en fonction de la mobilité**

Pour propager les mises à jour topologiques d’un puits, les nœuds capteurs ont besoin d’être en mode écoute. Si le mouvement du puits peut être prédit ou calculé en exploitant les connaissances sur le modèle de la mobilité du puits, il pourrait aider les nœuds à optimiser la détection du puits. Dans les situations où les heures de visite sont connues a priori ou calculables avec certaine précision, les cycles de service des nœuds peuvent être ajustés en conséquence pour les mettre en mode actif à l’heure d’arrivée prévue du puits mobile. Cependant, ceci est seulement applicable dans des situations où le puits suit toujours une certaine trajectoire tout en conservant une vitesse constante.

– **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 du puits (vitesse, direction, et l’intervalle de pause). Si les dernières informations de localisation d’un puits mobile ainsi que les informations sur la mobilité du puits 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 routes vers le puits. Cependant, cela provoquerait une énorme consommation d’énergie et diminuerait ainsi la durée de vie du réseau. D’autre part, si la dernière information de localisation se propage peu fréquemment ou seulement pour un nombre limité de nœuds, le chemin adopté pour la livraison des données peut ne pas être optimal en termes de nombre de sauts. De plus, la latence est fortement influencée par la période de pause du puits mobile. Dans certaines situations, le puits se dirige vers chaque nœud pour collecter les données. Dans de tels scénarios, si la taille des données est assez grande qu’elles ne peuvent être téléchargées par le puits durant le temps de contact, les nœuds devront attendre la prochaine tournée du puits mobile. Mais, cela produirait une augmentation de latence.

– **Augmentation de taux de perte de paquets**

En raison de l’indisponibilité des contacts fixes avec le puits mobile, les données sont transmises par chaque nœud capteur vers la dernière position connue du puits mobile. Cependant, 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 un puits mobile aurait quitté sa dernière position de manière significative, entraînant finalement la perte des données en raison d’un temps de parcours long.

## 2.8 Les modèles de mobilité du puits dans les réseaux de capteurs

Il existe trois modèles de mobilité de base d'un puits mobile dans un RCSF [24] : la mobilité aléatoire, prévisible et contrôlée. La mobilité aléatoire et prévisible des puits ne sont pas sous le contrôle du gestionnaire du réseau.

### 2.8.1 La mobilité aléatoire

Le mouvement du puits est fait d'une manière aléatoire en ce qui concerne la direction et la vitesse du mouvement. Dans ce type de mobilité, le puits est autonome dans son mouvement. La prochaine position du puits est imprévisible. Pour les applications tolérantes au délai, la mobilité aléatoire du puits prolonge la durée de vie du réseau [28] et elle est particulièrement applicable dans les situations où le déploiement du nœud est inconnu. Elle est utilisée quand le dispositif est attaché à une unité mobile tel un animal dont on ne peut prévoir son mouvement.

### 2.8.2 La mobilité prévisible

La mobilité prévisible est la plus simple parmi les trois modèles de mobilité. Elle est adaptée par le puits s'il suit toujours une certaine trajectoire par exemple une ligne droite, la périphérie de captage du champ. En utilisant ce modèle de mobilité, les nœuds peuvent prévoir l'heure de la visite du puits mobile [25] et donc d'optimiser la détection et la livraison de données. Ce type de modèle de mobilité est particulièrement attrayant pour des applications telles que les parkings où le puits mobile (pilote de voiture) peut se renseigner sur la disponibilité des places de stationnement dans une zone d'intérêt.

### 2.8.3 La mobilité contrôlée

La mobilité contrôlée se réfère à la situation lorsque l'observateur d'un réseau de capteurs peut contrôler le mouvement du puits mobile [27]. La mobilité contrôlée est utilisée par des puits si leur dispositif est relié à une unité mobile tel qu'un robot. La mobilité des puits contrôlée est basée sur l'hypothèse que les unités mobiles sensibles au contexte sont à la disposition du réseau. Le dispositif sensible au contexte calcule les éventuelles positions futurs sur la base des données générées par le champ de captage[28]. Selon l'objectif de l'application, le puits mobile adapte son mouvement (à la fois la vitesse et la trajectoire) d'une manière déterministe

pour obtenir de meilleurs résultats. Par exemple, si l'objectif est de prolonger la durée de vie du réseau, le puits fait son prochain déplacement vers les zones riches en énergie pour une consommation équilibrée d'énergie des nœuds. De même, dans les applications où la latence est critique, le puits se déplace vers la zone d'intérêt pour réduire les communications multi-saut. Cependant, le planning des visites du puits mobile doit être soigneusement adopté pour éviter des visites rares pour des segments particuliers du réseau qui peuvent entraîner une grande latence [29]. En termes de coût, la mobilité contrôlée n'est pas le meilleur choix, mais si le but est de réduire la latence, la mobilité contrôlée donne de meilleurs résultats que la mobilité aléatoire et prévisible[30].

## 2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la mobilité du puits, ses avantages et ses enjeux. Nous avons cité les différents modèles existants de mobilité dans les réseaux de capteurs avec puits mobile.

---

---

## CHAPITRE 3

---

# LES STRATÉGIES DE COLLECTE DE DONNÉES DANS LES RCSFS AVEC PUIITS MOBILES

### 3.1 Introduction

L'exploitation de la mobilité pour les réseaux sans fils est devenue une issue importante et a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche que ça soit pour les réseaux adhoc, les réseaux méchés, les RCSF ainsi que les réseaux véhiculaires. La mobilité est utilisée pour alléger le trafic et équilibrer la charge afin d'améliorer la consommation énergétiques dans les RCSF.

Une taxonomie des principales solutions pour la transmission des données vers les puits mobiles sera présentée dans ce chapitre. Dans un scénario de mobilité, les nœuds doivent garder trace de la dernière position de la station de base afin de lui délivrer les données capturées. Cependant, les changements topologiques affectent la consommation de l'énergie et devraient être contrôlés.

Dans ce chapitre, les schémas seront divisés en trois classes selon que le puits suit un chemin prédéfini ou pas ou que son mouvement soit contrôlé. Des tableaux comparatifs seront dressés pour chaque classe.

Nous terminons par un récapitulatif qui met l'accent sur les éléments prépondérants qui influencent les performances du réseau et leur effet sur le schéma de collecte.

### 3.2 Classification des schémas de collecte de données

Au cours des dernières années, un certain nombre de schémas de collecte de données ont été proposés pour les RCSFs mobiles. En se basant sur la mobilité des puits, nous classons ces schémas en trois catégories principales : schémas basés sur la mobilité du puits avec contrainte de chemin, schémas basés sur la mobilité du puits sans contrainte de chemin et schémas basés sur la mobilité du puits contrôlée. La figure 3.1 illustre la taxonomie des schémas de la collecte de données. Dans les sous-sections suivantes, nous discutons brièvement les schémas appropriés dans chacune de ces catégories.



FIGURE 3.1 – Classification des schémas de collecte de données

### 3.2.1 Schémas basés sur la mobilité avec contrainte de chemin

Dans cette catégorie, nous discutons les schémas de collecte de données où le puits suit un chemin prédéfini telle qu'une ligne droite, une périphérie, un chemin circulaire ou visite seulement un sous-ensemble de nœuds dans le champ de capture pour la collecte de données. Dans cette section, un état de l'art sur ces schémas y est donné, y compris leurs objectifs, les méthodologies, les points forts et les faiblesses.

★ Un schéma appelé Multiple Enhanced-deployed Sub-sinks (MESS) [31] pour RCSFs avec des trajectoires à chemin limité du puits est proposé. Une approche similaire a également été adoptée en [32]. MESS emploie plusieurs sous-puits pour la collecte des données provenant des nœuds plus éloignés. L'objectif est de réduire la communication de longue distance entre les nœuds source et le puits mobile et ainsi le délai. Les sous-puits sont considérés comme des nœuds sans fil améliorés ayant plus de capacité de stockage et qui sont déployés à des distances égales au long du chemin d'accès après le déploiement du reste des nœuds du réseau. De cette façon, l'emplacement des sous-puits crée une bande dans le champ de détection et fournit un ensemble des points de rendez vous avec le puits mobile comme le montre la figure 3.2.

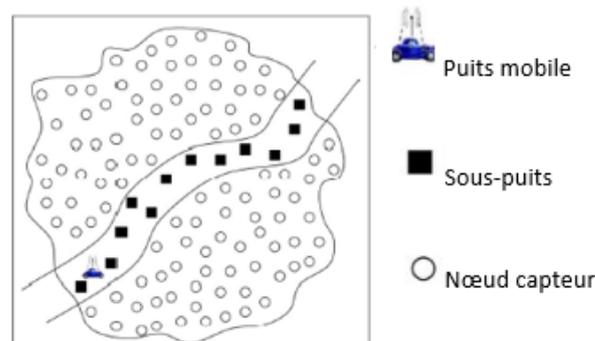


FIGURE 3.2 – Structure d'une bande dans MESS

Chaque sous-puits travaille comme un point d'accès au puits mobile, informe le segment de réseau souligné sur le service qu'il offre. A cet effet, chaque sous-puits envoie un message de diffusion (contenant son ID) de sorte que tous les destinataires placeraient le sous-puits comme le saut suivant. Dans le cas où un nœud reçoit des émissions de plus d'un sous-puits, il sélectionne son prochain-saut au puits selon la puissance du signal reçu. Par conséquent, les voisins des sous-puits diffuseraient cette alerte des routes 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 du puits mobile est assez lente pour recueillir toutes les données récoltées par au moins deux sous-puits le long de sa trajectoire tout en se déplaçant continuellement. Cependant, dans des réseaux à grande échelle, chaque sous-puits pourrait collecter des données pour un grand nombre de nœuds capteurs et, par conséquent, elles ne peuvent être livrées au puits mobile en une seule tournée. En conséquence, une grande latence serait causée dans la livraison des données au puits. Une autre implication est l'utilisation de nœuds spécialisés travaillant comme sous-puits, qui non seulement ont besoin d'être riches en capacité de stockage, mais aussi en énergie. Ces implications ainsi que la vitesse fixe du puits mobile limite son utilisation seulement à certaines applications environnementales. De même, les nœuds dans le voisinage des sous-puits vont subir un épuisement d'énergie rapide réduisant ainsi la durée de vie globale du réseau.

★ Chen a proposé un algorithme appelé Virtual Circle Combined Straight Routing(VCCSR) [33] pour une collecte de données efficace dans les RCSFs mobiles. L'algorithme forme une structure virtuelle qui se compose de plusieurs cercles et plusieurs lignes droites et un ensemble de cluster heads qui se trouve dans ces cercles et ces lignes droites. En utilisant l'algorithme VCCSR, nous pouvons obtenir les emplacements de tous les cluster heads en calculant les points médians des chemins virtuels. Le cluster head est responsable de la collecte des données de son cluster et la livraison des données au puits mobile via la structure arborescente.

L'algorithme construit un arbre du plus court chemin virtuel en utilisant des clusters heads ; et définit les règles de communication utilisées pour fournir des données au puits mobile et pour ajuster les routes lorsque le puits mobile se déplace.

La figure 3.3 représente un exemple de la structure virtuelle recouvrant le champ de capture.

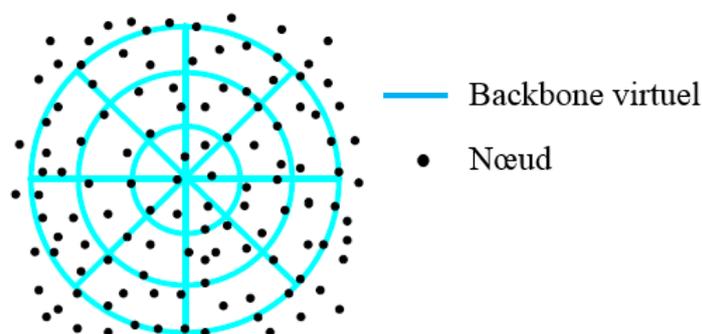


FIGURE 3.3 – Cercles virtuels et lignes droites

Du fait que les nœuds capteurs sont déployés de façon aléatoire, l'algorithme VCCSR trouve

et nomme les nœuds qui sont les plus proches des points du cluster en tant que tête de cluster dans la structure virtuelle. Ces clusters heads forment une structure virtuelle selon les règles de communication régulière.

★ Oliveira a proposé un algorithme appelé algorithme de routage à grande vitesse (Wireless High Speed Routing(Whisper))[34] pour envoyer des données vers le puits et vise à assurer une livraison garantie des données. L'algorithme est basé sur l'idée que le puits, en raison de sa grande vitesse, ne restera pas à l'endroit où il a injecté la requête et donc il envoie la réponse vers le nouvel emplacement du puits à grande vitesse. Il suppose que tous les nœuds connaissent leurs emplacements, les emplacements de leurs voisins, la trajectoire du puits (Inclus dans le paquet de requête) et le déplacement.

En outre, il suppose que le puits ne change pas de vitesse et suit une trajectoire le long d'une ligne droite. Les nœuds capteurs vont générer la réponse et la transmettre vers le point de rencontre estimé avec le puits. Le point de rencontre est estimé en considérant les différents délais dans la transmission des messages ainsi que l'emplacement du nœud, la position des voisins, et les informations fournies dans le paquet requête. Ce schéma est limité du fait qu'il impose deux contraintes, à savoir, la vitesse constante du puits mobile et sa future trajectoire, qui ne sont pas des hypothèses réalistes. Dans la plupart des cas, le puits mobile change sa vitesse et ses directions.

★ Tacconi a proposé un schéma de transmission de données en considérant l'énergie et le délai[35] spécifiquement dédié à incorporer les RCSFs dans un système de transport intelligent. Il suit une stratégie de collecte de données orienté requête . En utilisant ce schéma, pour transmettre une réponse vers le puits mobile, le routage géographique traditionnel est optimisé de telle sorte que le prochain saut est choisi sur la base de la distance relative du nœud par rapport au puits et son niveau d'énergie résiduelle.

Dans le scénario considéré, comme représenté sur la figure 3.4, une voiture (puits mobile) injecte une requête (comme des informations sur les emplacements de stationnement) dans le champ de capture via des nœuds situés sur la bordure de la route (vice-puits), et par conséquent recueille la réponse de l'un des vice-puits le long de sa trajectoire.

La requête contient des informations telle que l'ID du puits mobile, ses coordonnées, vitesse, direction, les coordonnées de la zone cible le long de son rayon. Tous les nœuds, y compris les vice-puits, connaissent leur position et transmettent ainsi la requête vers la zone d'intérêt en utilisant le routage géographique.

Un nœud central dans la zone d'intérêt recueille l'information demandée, génère un message de réponse et en fonction de l'information de mobilité fournie dans le paquet de requête, estime la position du puits mobile. En conséquence, il transmet la réponse attendue vers l'emplacement du puits par une communication multi-sauts.

Enfin, le message de réponse est délivré au plus proche vice-puits. Si le puits mobile n'est pas encore arrivé au vice-puits, il attend le puits mobile et délivre le message de réponse à son arrivée. Toutefois, si le puits mobile est déjà dépassé par le vice-puits, ce dernier achemine le message de réponse vers le prochain vice-puits via son voisin à un saut.

Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le message de réponse soit livré au puits mobile ou il expire et donc soit supprimé. Le schéma proposé réalise une utilisation équilibrée de la consommation d'énergie des nœuds et du délai pour la transmission des messages au puits mobile[35]. Cependant, il n'est pas adapté aux situations où la trajectoire du puits n'est pas connue a priori ou ne peut pas être prédite.

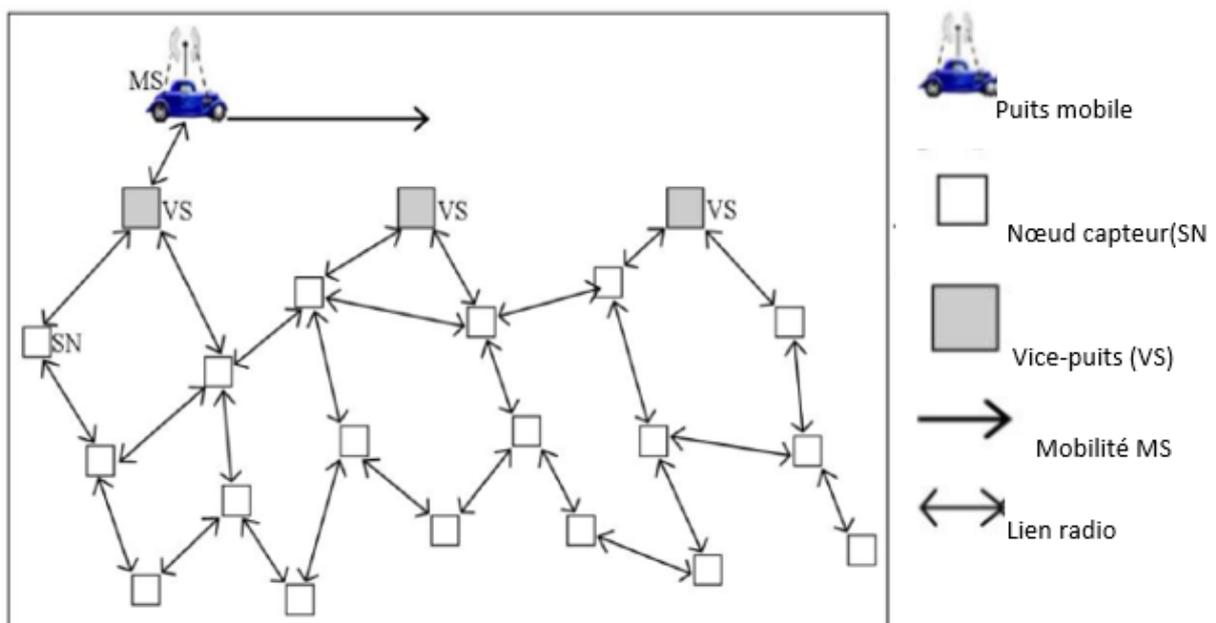


FIGURE 3.4 – Architecture du système

★ Dans le schéma proposé dans [36], la livraison de données aux puits mobiles est considérée pour les applications tolérantes au délai. Il vise à réduire le nombre de transmissions nécessaires pour fournir des données aux puits mobiles en exploitant ainsi la connaissance des trajectoires probables des puits mobiles. Il exploite le fait que dans certaines applications environnementales, le puits mobile connaît ses futures trajectoires contraignées par le modèle de mobilité. Ainsi, dans la phase initiale, les puits mobiles annoncent un ensemble de trajectoires anticipées

(hors ligne) aux nœuds sous la forme d'une diffusion destinée à l'ensemble du réseau. Dans cette approche, les données capturées ne sont pas directement acheminées vers les puits mobiles, mais plutôt à des relais qui se trouvent tout au long d'une des trajectoires du puits mobile. Ces relais cachent les données reçues et les délivrent au puits lors de son passage près d'eux dans l'avenir. Il essaie aussi de prédire avec précision un ensemble de points de sauvegarde de données couvrant toutes les trajectoires des puits mobiles qui peuvent être potentiellement visitées par les puits dans un futur proche.

En outre, il oblige d'avoir au moins un point de sauvegarde sur chaque trajectoire, assurant ainsi que les données ne seront pas perdues et seront récupérées par au moins un puits mobile. Pour trouver les points optimaux, la programmation linéaire est adoptée pour chaque source de données pour faire face à l'incertitude sur la trajectoire du puits mobile.

Ce système permet d'assurer la livraison des données aux puits mobiles au détriment de la consommation d'énergie sous forme de transmissions redondantes dans des directions différentes

★ Pour assurer une livraison de données sans interruption au puits mobile, un schéma basé sur la prédiction de la mobilité est proposé dans [37]. Ce schéma fournit des données du capteur au puits mobile via des nœuds relais qui sont prédits en se basant sur le graphe de mobilité du puits mobile. Le graphe de mobilité est pré-calculé en se basant sur une séquence des nœuds qui reçoivent des signaux relativement forts du puits mobile.

A Chaque fois, où le puits mobile se déplace d'un nœud de relais au prochain, il inonde le réseau avec l'information sur le prochain nœud relais et l'heure d'arrivée préalables. Cela aide les nœuds capteurs à ajuster dynamiquement leurs routes vers le prochain nœud relais prédit en fonction du temps d'arrivée prévue du puits mobile.

Les résultats expérimentaux révèlent un taux élevé de livraison de paquets avec la faible vitesse du puits mobile et qui dégrade progressivement quand la vitesse augmente.

★ Pour améliorer la durée de vie du réseau et la fiabilité des données, une solution est proposée dans [38] qui est basé sur une architecture trois-tiers.

Le niveau 1 est constitué par tous les nœuds capteurs, tandis que les puits mobiles travaillent en tant que collecteurs de données constituent le niveau2 et une station de base statique forme le niveau3. Pour la collecte de données, une mobilité prévisible des puits est adoptée et plusieurs puits mobiles approchent les nœuds capteurs dans différents segments du réseau formant ainsi des clusters autour d'eux. Par conséquent, les puits mobiles sont à un seul saut des nœuds capteurs, collectent leur données et les rapportent à la station de base.

Cependant, pour éviter un grand délai, les nœuds envoient les données capturées vers une position anticipée du puits. En cas de paquets de grandes tailles, le système proposé les divise en plusieurs petits paquets et les délivre simultanément à divers puits mobiles, en supposant qu'ils seront rassemblés au niveau de la station de base statique. En outre, pour assurer la livraison des données, le schéma réduit la vitesse des puits assurant ainsi une longue durée de contact entre les nœuds et les puits mobiles. Le système proposé permet d'obtenir une meilleure durée de vie du réseau et des taux de livraison de paquets élevés en employant plusieurs puits mobiles avec leur vitesse réduite et fixe. Cependant, la vitesse limitée augmente la latence.

★ Le schéma proposé par Akkaya et Younis dans [39], vise à équilibrer la consommation d'énergie et la latence. Le schéma proposé minimise les coûts topologiques causés par la mobilité du puits et fait des ajustements dynamiques de la route. Il adapte la topologie du réseau en exploitant la connaissance partielle ou complète sur la carte de navigation et l'horaire de déplacement du puits mobile.

Par conséquent, il suppose que le puits mobile se déplace par étapes le long d'une ligne droite pour atteindre les positions intermédiaires, où la taille de la phase est prise conformément à la vitesse du puits. Initialement, en fonction de la position initiale du puits mobile, les routes sont définies d'une manière efficace en énergie à faciliter l'acheminement des données jusqu'à ce que le puits se déplace vers la prochaine position intermédiaire. Quand il se déplace d'un point à l'autre, la topologie du réseau est réévaluée.

Dans le processus de réévaluation, l'un des trois choix suivant est pris :

- (1) le puits mobile est encore à la portée de l'ancien nœud voisin ;
- (2) nœuds expéditeurs sont découverts ;
- (3) le reroutage est nécessaire.

Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le puits mobile arrive à une position terminale. En utilisant le premier choix, le puits charge l'ancien nœud voisin pour ajuster sa radio pour couvrir le prochain mouvement du puits si son énergie résiduelle est suffisante. Lorsque l'énergie résiduelle n'est pas suffisante, le puits passe au deuxième choix pour désigner un expéditeur. Enfin, si aucun expéditeur raisonnable n'est disponible, le puits exerce la dernière option de mettre en place de nouvelles routes. Le reroutage est également déclenché si les chemins actuels vers le puits ne satisfont pas le délai bout à bout.

Une bonne caractéristique de ce schéma est que lorsque le puits se rapproche de son prochain arrêt, il peut encore entendre la communication entre ses anciens et nouveaux nœuds voisins et la reçoit directement. Il en résulte la réduction globale du délai moyen de ce paquet, ce qui minimise le nombre de communications multi-sauts.

La principale limitation de ce schéma est l'hypothèse que la carte de navigation et la planification du puits sont connus, qui ne peut être réalisé dans de nombreux applications environnementales.

Les schémas de collecte de données basés sur les chemins prédits mentionné ci-dessus sont résumées dans le tableau 3.1. Il illustre chaque schéma en termes de contraintes qu'il impose à la mobilité du puits, le nombre de puits participant à la collecte de données, les modes de communication des données, architecture réseau, mécanisme de contrôle de surcharge du réseau, une estimation du contrôle de surcharge du réseau, ainsi que le principal objectif(s)

### 3.2.2 Schémas basés sur la mobilité sans contrainte de chemin

Dans cette section, nous discutons plusieurs systèmes de collecte de données où le puits se déplace de manière autonome et n'a pas de contraintes sur sa trajectoire. Le puits peut visiter des nœuds partout dans le champ de capture pour la collecte des données. Dans le reste de cette section, un aperçu de l'état de l'art des schémas est donné, y compris leurs objectifs, les méthodologies, les forces et les faiblesses.

★ Shi [40] a proposé un protocole de routage efficace orienté données (DDRP) pour les RCSF mobile qui vise à réduire les coûts généraux de contrôle dans la découverte / maintenance des routes et à améliorer la fiabilité. Dans DDRP, le puits mobile diffuse périodiquement des beacons (contenant l'ID du puits et un timestamp) à ses voisins à un saut quand il passe près d'eux. De cette façon, les nœuds voisins découvrent l'existence du puits dans leur voisinage. Ces voisins du puits ne vont pas propager le beacon, mais chaque paquet de données porte un champ supplémentaire, appelé Dist2Sink (Distance to Sink), qui stocke la plus petite distance connue (nombre de sauts) au puits en utilisant ce nœud. Pour les nœuds voisins du puits, Dist2Sink = 1 et pour d'autres, il pourrait être 2, 3, ..., K, en fonction de leur profondeur à l'intérieur du champ de capture. K correspond à une certaine valeur maximale pour limiter le nombre maximum de sauts. Au-delà Dist2Sink = Infinie, ce qui signifie des nœuds sans routes vers le puits. Les nœuds dont Dist2Sink est égale à l'infini, attendent un certain temps pour découvrir

une route valide vers le puits. Toutefois, si aucun message n'est reçu dans un délai limité, les nœuds adoptent une stratégie de marche aléatoire jusqu'à ce que le paquet trouve une route valide vers le puits ou qu'il soit expiré. En plus de Dist2Sink, chaque paquet de données porte également des informations timestamp (l'instance de temps lorsqu'une route a été découverte vers un puits mobile) qui est utilisé pour éviter les boucles de routage.

Le principal inconvénient de DDRP est que à chaque mouvement du puits mobile, les changements topologiques conséquents se propagent dans l'ensemble du réseau en utilisant le mécanisme de surécoute. La surécoute compromet considérablement les réserves énergétiques des nœuds [54] du fait que les nœuds doivent être en mode écoute afin d'apprendre le dernier emplacement du puits.

★ Tashtarian [41] a proposé un algorithme de collecte de données efficace en énergie pour les RCSFs mobiles basé sur les clusters. Dans un premier temps, il divise l'ensemble du réseau en clusters partiellement imbriqués et classe les nœuds comme Clusters-Head (CHS) et Cluster-Membres (CMS). Les CH collectent les données à partir de leurs CMs selon un certain plan MAC. Pour envoyer les données au puits mobile, le CH vérifie d'abord si le puits est accessible dans sa portée radio initiale. Cependant, si le puits n'est pas accessible avec la configuration par défaut, le CH augmente sa puissance d'émission afin d'atteindre le puits comme le montre la Figure 3.5. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le CH trouve le puits mobile dans sa nouvelle zone de couverture. À ce moment, le puits mobile entre dans un état stationnaire jusqu'à ce qu'il reçoive toutes les données collectées par ce CH. Ce système remplace simplement la communication multi-saut par une seule communication à longue portée, sans tenir compte des ressources limitées (réserve d'énergie limitée, courte portée radio) des nœuds capteurs. La communication radio à longue portée peut également perturber la communication dans d'autres groupes provoquant ainsi des collisions impliquant des retransmissions qui augmentent la consommation d'énergie et des délais importants pour les nœuds perturbés. En outre, il n'incorpore pas les modèles de mobilité du puits et le laisse au concepteur de l'application.

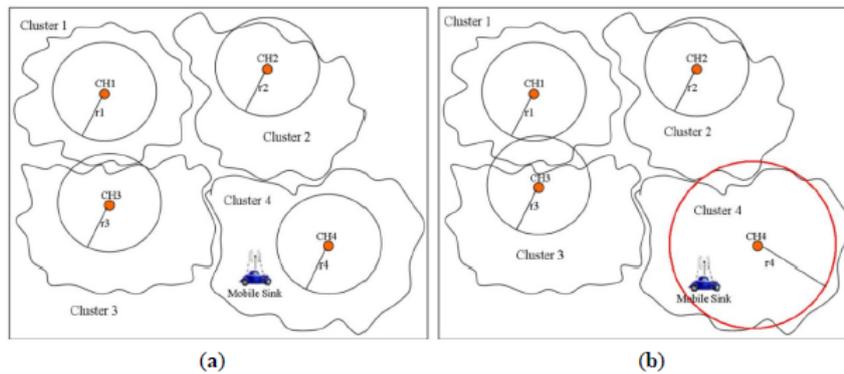


FIGURE 3.5 – (a) Topologie du réseau avec les paramètres de la radio par défaut ; (b) Topologie du réseau après réglage de la radio

★ Inspiré par le comportement alimentaire des termites, le schéma de routage termitière pour RCSF [42] vise à obtenir de meilleures performances en termes de réduction des coûts de contrôle, découverte de route rapide et la consommation d'énergie globale. Il ne suppose aucune connaissance préalable sur la configuration du réseau. Les routes sont choisies en fonction de l'utilisation de l'énergie. Les routes sont découvertes à la demande, à savoir, lorsque les nœuds doivent reporter un événement. Pour la découverte de route vers le puits, le nœud génère un paquet forward-soldier qui est diffusé à tous les voisins. À la réception de ce paquet, le nœud intermédiaire cherche une route valide vers le puits dans sa table de routage et s'il en trouve une, il génère et renvoie un paquet backward-soldier au nœud source. Toutefois, s'il y en a pas de route valide vers le puits, il enregistre un chemin reserve vers le nœud source (pour une utilisation future) et continue la diffusion du paquet forward-soldier. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le paquet forward-soldier arrive à sa destination (puits mobile). En conséquence, le puits, sur réception de ce paquet, met en place un paquet backward-soldier et le transmet au nœud source en unicast.

Tous les nœuds intermédiaires lors de la réception du paquet backward modifient leurs tables de routage mettant ainsi un pointeur vers le puits et transmettent le paquet backward le long du chemin réserve déjà enregistré saut-par-saut. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le nœud source original reçoit le paquet vers backward-soldier. Bien que ce système soit assez simple, il ne prend pas en compte le modèle de mobilité du puits en plus des coûts associés à la découverte des routes, la latence et les pertes de paquets.

★ Pour minimiser le flux de contrôle du réseau en raison de la mobilité du puits, le routage élastique a été proposé par Yu . [43] qui exploite la diffusion broadcast des nœuds capteurs. Pour

faire face à la mobilité du puits, le nouvel emplacement du puits se propage le long du chemin inverse du routage géographique vers le nœud source via le mécanisme de surécoute. IL prétend que la solution proposée réduit les messages de contrôle du réseau, la latence et la consommation d'énergie par rapport à d'autres solutions existantes sur la mobilité du puits. Il suppose que tous les nœuds connaissent leur emplacement et donc partagent l'information de localisation avec les voisins via des messages beacons. En outre, il suppose l'existence de canaux bidirectionnels entre deux nœuds voisins. Dans la phase initiale, la source détermine l'emplacement du puits avec un certain service de localisation du puits. Pour le transfert de données, un nœud source cherche d'abord un chemin valide vers le puits dans sa liste de voisinage, autrement une approche de retransmission par grille introduite dans [55] est adopté pour la détermination de la route vers le puits. Toutefois, avant que les données transmises atteignent le puits, le puits pourrait avoir changé sa position. Pour faire face à cette situation, le routage élastique propose ainsi les beacons périodiques pour informer sur les nouveaux nœuds voisins, ces nœuds sont également mis à jour avec la dernière position du puits à partir de laquelle le puits a reçu le dernier paquet.

Ce phénomène est illustré dans Figure 3.6, où le puits est inaccessible par le dernier saut A, alors il communique son dernier emplacement au nœud A par une retransmission par grille. En conséquence, le nœud A met à jour les informations d'emplacement du puits dans le paquet de données et définit B comme le prochain saut vers le puits. Le routage élastique retrace la mobilité du puits de cette façon, et donc assure la livraison de données aux puits mobiles. Pour une autre propagation de la dernière position du puits dans le réseau, le routage élastique utilise le surécoute des nœuds capteurs sans fil. Comme il suppose un canal bidirectionnel entre deux nœuds voisins, donc chaque fois que le nœud voisin du puits envoie des données au puits, il est entendu par d'autres nœuds voisins dans les environs. Ce processus de surécoute va étape par étape dans la transmission de données jusqu'à ce que le nœud source apprenne le dernier emplacement du puits mobile. Le routage élastique propose qu'à chaque message surécouté, chaque nœud doit comparer sa distance vers le nouvel emplacement du puits à la distance de l'expéditeur du message. Ainsi, si la distance de l'expéditeur du puits est plus courte que sa propre distance, il cache la dernière information de localisation du puits, sinon il l'ignore.

La principale limitation de ce système est le long temps de propagation qui implique une latence importante. En outre, il intègre le dernier emplacement du puits dans chaque paquet de données et exploite le mécanisme de surécoute pour propager les dernières informations de localisation du puits, ce qui ne donne pas d'importantes économies d'énergie.

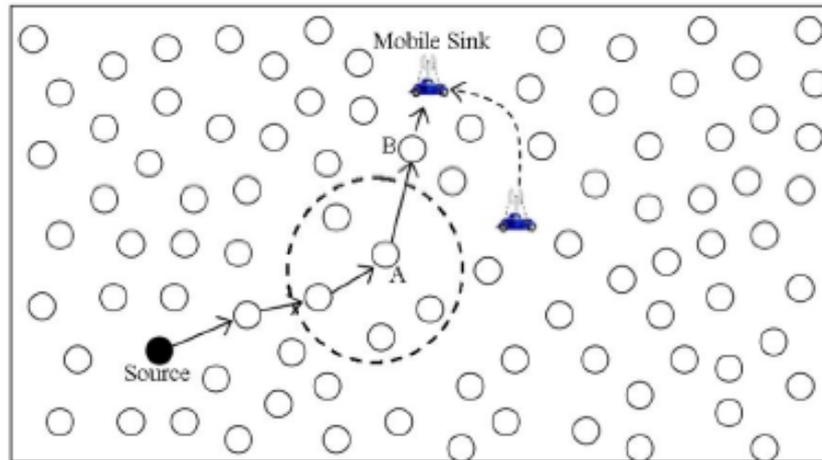


FIGURE 3.6 – Traçage du puits mobile

★ Un protocole évolutif de dissémination asynchrone efficace en énergie (SEAD) a été proposé dans [44] qui vise à prolonger la durée de vie du réseau en utilisant plusieurs puits. SEAD construit un arbre de dissémination (appelé d-arbre) à la fois pour le routage et la mise en cache des données. Tout puits mobile intéressé par la communication avec la source de l'arbre rejoint le d-arbre en envoyant une requête de jointure à l'un de ses nœuds voisins. Ce voisin devient le nœud d'accès au puits et s'occupe de la livraison des données. Le nœud d'accès lors de la réception de la requête de jointure, construit de manière récursive un d-arbre en exploitant les informations de localisation géographique. Le nœud d'accès garde également la trace de la mobilité du puits. Le d-arbre est mis à jour chaque fois que le puits change son nœud d'accès. Toutefois, pour éviter la reconstruction fréquente de l'arbre causée par la mobilité, le puits ne choisit pas un autre nœud d'accès jusqu'à ce que les nombres de sauts entre le puits et le nœud d'accès dépassent un certain seuil. Quand un nouvel nœud d'accès est sélectionné, l'ancien nœud d'accès est informé. Cette stratégie est adoptée pour maintenir le compromis entre les dépenses de l'énergie dans la reconstruction de l'arbre et le délais. En outre, pour diffuser les données à plusieurs puits, un ensemble de nœuds entre la source et les puits sont choisis comme réplique qui conserve les données de la source temporairement. Un exemple modèle d'arbre SEAD est représenté sur la figure 3.7.

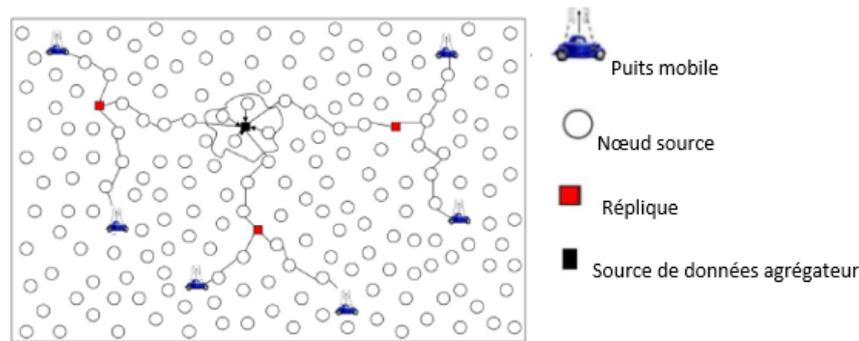


FIGURE 3.7 – modèle d'arbre de dissémination de données dans SEAD

SEAD réalise 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 du puits) et il n'est donc pas adapté aux applications sensibles au délai. En outre, pour maintenir le d-arbre, si une source n'a plus de données à envoyer, il envoie toujours des messages aux puits, ce qui entraîne une consommation d'énergie inutile.

Les systèmes de collecte de données mentionnés ci-dessus qui n'imposent pas de contraintes sur le chemin du puits mobile (s) sont résumés dans le tableau 3.2. Il illustre chaque schéma en termes de contraintes imposées à la mobilité des puits, le nombre de puits concernés pour la collecte des données, les modes de communication des données, l'architecture du réseau, mécanisme de contrôle du réseau, une estimation des coûts de contrôle, ainsi que l'objectif (s) principal.

### 3.2.3 Schémas de collecte de données basés sur la mobilité contrôlée

Dans cette section, les systèmes de collecte de données où la mobilité du puits est sous le contrôle de l'observateur du réseau pour atteindre un objectif spécifique sont discutées.

L'objectif dépend fortement des applications où dans la plupart des cas, il améliore la durée de vie du réseau, alors que certains mettent l'accent sur l'amélioration de taux de livraison de paquets ou en réduisant la latence pour répondre aux besoins de communication en temps réel.

★ Aioffi [45] a proposé un système de dissimulation de données basée sur la structure virtuelle pour une collection de données efficace à l'aide du puits mobile. Le système proposé vise à réduire la latence optimisant ainsi le compromis entre la durée de vie du réseau et la latence. Pour ce faire, il adopte des algorithmes d'optimisation (CIPR [52] et ILS [53]) pour définir

des politiques optimales de contrôle de densité, le regroupement des capteurs en clusters et les routes vers le puits. Il impose des contraintes topologiques (le regroupement des capteurs) pour réduire la consommation d'énergie et éviter les collisions, permettant ainsi uniquement aux CHs de communiquer avec le puits mobile lorsque les puits passent près d'eux.

Il intègre conjointement les problèmes de clusterisation et de routage, fournissant ainsi une infrastructure virtuelle (toutes les positions des CHs) pour les visites des puits mobiles.

L'idée derrière la formation de cluster est de réduire l'ensemble des nœuds qui doivent être visités par les puits mobiles, entraînant ainsi la réduction de la latence avec moins de consommation d'énergie grâce aux plus courts chemins vers le puits. Après le regroupement, il détermine ensuite un ensemble de routes pour les puits mobiles tels que chaque nœud capteur soit couvert par cette route, ou qu'il soit dans la portée d'un CH dans une autre route. Pendant le mouvement du puits, chaque puits diffuse un message à chaque seconde pour alerter les nœuds proches pour se préparer à la communication. Les nœuds capteurs lors de la réception de l'alerte et une fois en contact avec les puits mobile transmettent leurs données stockées (S'il y en a).

Pour éviter les collisions, s'il y a trop de transmissions, le processus est interrompu et un ordonnancement est adopté lorsque les puits mobiles arrivent aux CHs. Le système proposé réduit la latence en utilisant plusieurs puits mobiles fonctionnant simultanément dans les différents segments du champ de capture réduisant ainsi le temps d'attente des nœuds pour fournir leurs données aux puits. Cependant, l'utilisation de plusieurs puits mobiles limite son usage à certaines applications seulement. En outre, la communication directe des puits mobiles avec les nœuds capteurs ou seulement par un seul saut avec les CHs peut ne pas être possible dans certaines situations comme dans les champs de bataille ou dans des environnements forestiers.

★ Kinalis a proposé une méthode de collecte de données efficace en énergie et gérant la latence avertie dans RCSFmobile qui exploite la mobilité du puits avec des temps d'arrêt adaptatifs [46]. Il est basé sur l'idée qu'en raison de la mobilité du puits, certains nœuds ne peuvent pas terminer la transmission de leurs données au puits et ils doivent donc attendre le prochain passage du puits. Il en résulte une latence élevée et des pertes de paquets potentiels.

Ce problème s'aggrave si la densité des nœuds dans une zone est élevée ou si les nœuds ont une quantité importante de données enregistrées [46]. Pour résoudre le problème de court séjour du puits mobile dans une zone densément déployée, ce schéma introduit une adaptation du temps de pause proportionnelle au trafic local des données.

Pour ce faire, il faut des connaissances sur les ressources globales du réseau tels que les réserves énergétiques initiales du réseau et donc des informations sur la durée de vie du réseau. En outre,

il suppose que dans certaines zones plus de capteurs sont déployés par rapport à d'autres zones. Ainsi, on suppose que quelques *pockets* (zones à forte densité de nœud) existent dans le réseau. En conséquence, pendant le mouvement du puits, il fait relativement de grandes pauses dans des régions à forte densité du nœud. Pour la traversée du réseau, il suppose qu'un graphe est formé au cours de la phase d'initialisation du réseau  $G_0 = G(V, E)$  superposé dans la zone du réseau, comme illustré sur la figure 3.8.

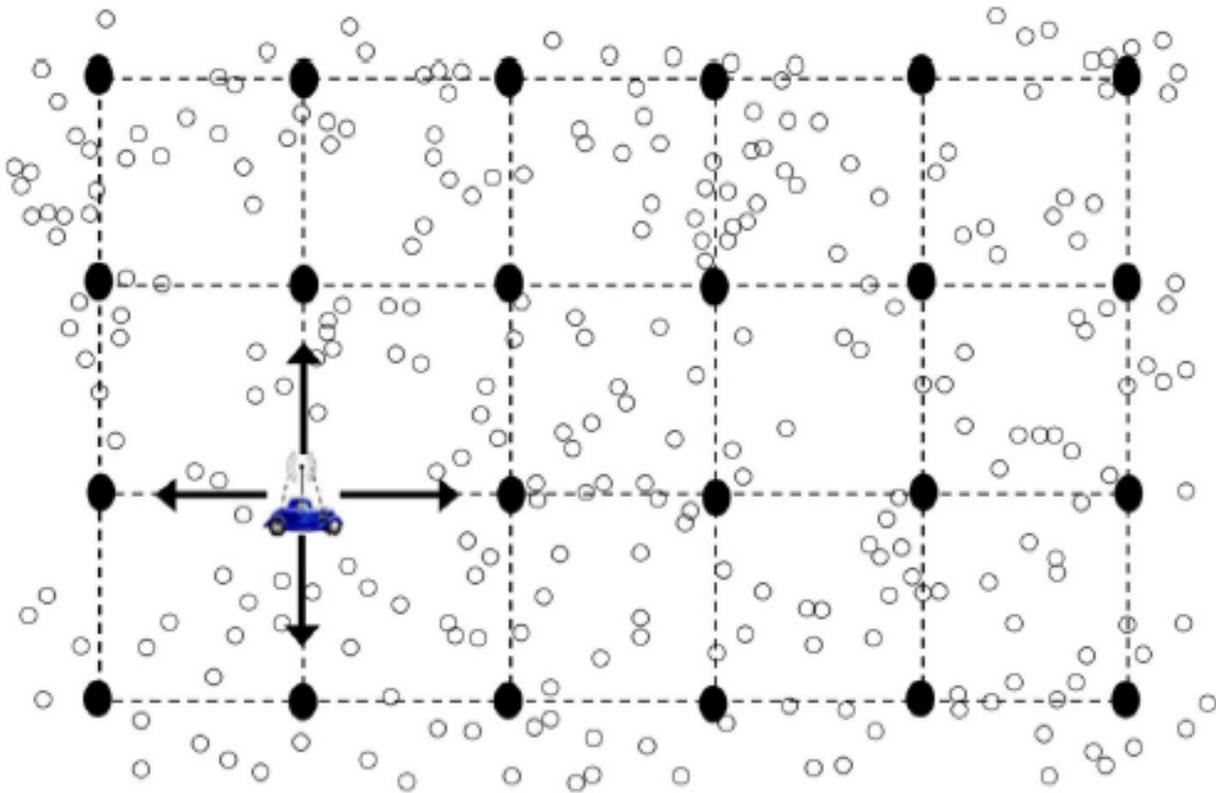


FIGURE 3.8 – Exemple de superposition graphique  $G_0$  pour la traversée du réseau [46]

Pour supporter différents scénarios d'application, il utilise à la fois les modèles de mobilités de marche déterministe et de marche aléatoire biaisés pour la traversée du réseau. Dans la marche déterministe, le puits traverse chaque cellule couvrant ainsi toute la zone du réseau. Dans certains scénarios, où la topologie du réseau n'est pas connue pour le puits, un modèle de mobilité de marche aléatoire est adopté. En outre, pour assurer une couverture équitable des différentes zones du réseau, le modèle de marche aléatoire biaisée est ainsi adaptée à la fin de chaque période de pause. Les régions moins fréquemment visitées sont favorisés pour le prochain mouvement du puits en enregistrant les visites de chaque sommet.

Ce schéma réalise relativement de meilleures performances en termes de réduction de la

latence par l'introduction du mécanisme de temps de pause adaptatif. Bien que ce mécanisme soit bénéfique pour le segment de réseau actuel, il peut provoquer de grandes latences pour d'autres segments du réseau en raison de l'augmentation de la durée de pause du puits.

★ Pour résoudre le problème du point chaud ou celui du trou d'énergie, Nazir et Hasbullah ont proposé un protocole de routage basé sur un puits mobile (MSRP) dans RCSFs [47] basés sur les clusters, visant à prolonger la durée de vie du réseau. Dans un cluster, un CH effectue la collecte de données à partir de ses membres et attend l'arrivée du puits mobile. Chaque fois qu'un puits mobile se déplace, il diffuse un plan TDMA à tous les CHs dans sa zone de couverture.

Chaque CH suivra le plan pour transmettre ses données déposées au puits mobile. Le puits mobile garde trace de l'énergie résiduelle de tous les CHs. Ainsi, il favorise les zones riches en énergie et, par conséquent, se déplace vers le CH ayant plus d'énergie résiduelle. Un puits mobile recueille des données non seulement des CHs, mais aussi d'autres nœuds voisins lors de son déplacement. De cette manière, une utilisation équilibrée de l'énergie est assurée et cela évite le problème du point chaud. Cependant, il ne prend pas en compte la latence et les pertes de paquets associées à la mobilité du puits. En utilisant cette approche, le puits se déplace toujours vers des zones riches en énergie, provoquant ainsi une très grande latence des parties du réseau où certains événements se produisent le plus souvent et que leur énergie résiduelle est relativement faible.

★ Pour prolonger la durée de vie du réseau, tout en assurant les exigences de délai en temps réel, Banerjee utilise plusieurs CHs mobiles riches en énergie dans [48], où les CHs mobiles coopèrent pour collecter les données à partir de différents segments du réseau et les livrer à une station de base. La station de base, qui est statique, se situe au centre du champ de capture et reçoit les données des CHs au sein de sa zone radio. Cette configuration est représentée sur la figure 3.9.

Pour satisfaire les exigences en temps réel, tous les CHs se déplacent de manière collaborative assurant la connectivité avec la station de base tout en couvrant tous les nœuds qui signalent l'événement en même temps. En outre, les CHs sont déplacés à l'aide de trois stratégies différentes pour réduire la communication multi-sauts et améliorer la durée de vie du réseau.

Dans la première stratégie, les CHs sont déplacés vers les nœuds capteurs riches en énergie. Cette approche est inspirée du fait qu'un événement qui se produit est susceptible d'être détec-

tée par le groupe de nœuds capteurs voisins, ce qui conduit à une dissipation d'énergie spéciale et distribuée.

Dans la deuxième stratégie de mobilité, les CHs se déplacent vers la zone de l'événement indiquée par un plus grand trafic. Cette stratégie est adoptée pour réduire la durée probable des transmissions/réception, en réduisant ainsi la distance entre les CHs et la source de l'événement.

Enfin, dans la troisième stratégie, une approche hybride est adoptée, en sélectionnant d'abord la direction des CHs vers la source d'événement et en se déplaçant vers la source de l'événement, la stratégie de mobilité basée sur l'énergie résiduelle est adoptée.

Les résultats expérimentaux obtenus dans [48] montrent une augmentation de jusqu'à 75% de l'énergie résiduelle. Cependant, l'usage de CH riches en énergie et les coûts associés limitent l'utilisation de ce schéma.

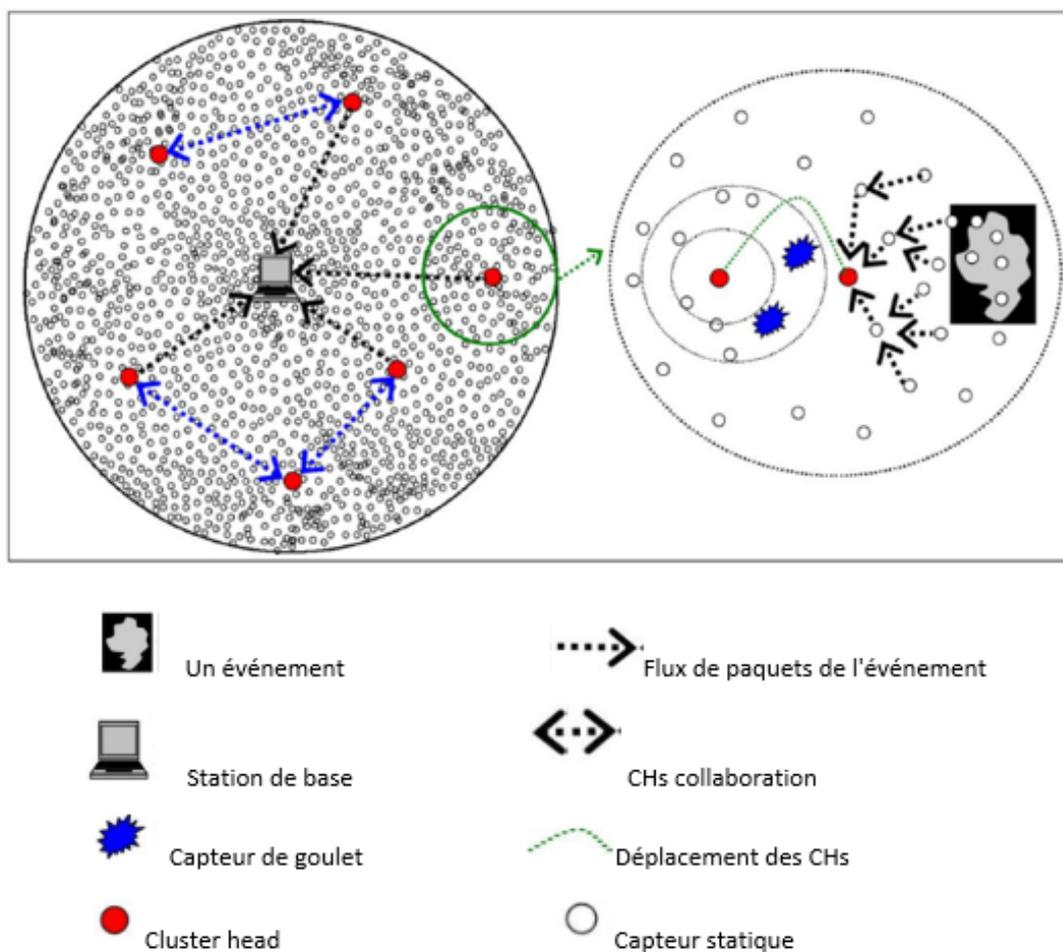


FIGURE 3.9 – Modèle de mobilité basé sur plusieurs clusters heads [48]

★ Une autre contribution à la prolongation de la durée de vie du réseau en exploitant la mobilité contrôlée a été proposée par Basagni. dans [49]. Dans l'approche proposée, quelques contraintes sont prises en compte comme la façon dont le prochain mouvement du puits affectera la latence et la consommation d'énergie des nœuds dans l'ajustement des routes vers le puits mobile. Ainsi, afin de contrôler le taux de mobilité du puits, un intervalle de pause minimum est imposé à chaque site. Pour la mobilité du puits, il définit une heuristique appelée énergie résiduelle maximale avide (GMRE) qui dicte la mobilité du puits vers des sites riches en énergie, mais en conformité avec le coût de réajustement des routes vers ce site. Par conséquent, si le site est une zone à énergie relativement haute que le site actuel et le coût de contrôle est non significatif, le puits se déplacera vers ce nouveau site, sinon il restera à son emplacement actuel.

Pour connaître l'énergie résiduelle des nœuds dans des sites adjacents, le puits sélectionne un nœud responsable de la collecte de l'énergie résiduelle des nœuds dans son site.

Le nœud à chaque demande du puits mobile répond avec les informations collectées. L'approche contrôlée comme a conséquence une consommation d'énergie équilibrée sur tout le réseau et donc elle améliore la durée de vie. On prétend que cette mobilité contrôlée améliore à 50% à 100% la durée de vie du réseau par rapport à la mobilité aléatoire incontrôlée.

La principale limitation de ce schéma est que les zones pauvres en énergie seraient toujours négligées et causeraient une grande latence pour la livraison des données au puits mobile. En outre ; pour maintenir des profils énergétiques des différentes zones du réseau, une quantité considérable de la réserve d'énergie serait consommée car les nœuds doivent signaler leur niveau d'énergie à chaque demande.

★ Le protocole de routage MobiRoute proposé par Luo dans [50] se concentre sur le routage proactif vers un puits mobile où les nœuds capteurs envoient leurs données dans un mode multi-saut. Il suppose que le modèle de mobilité du puits est discret dans lequel le puits se déplace le long de plusieurs points cibles et fait des pauses temporaires en ces points. L'intervalle de temps de pause du puits est beaucoup plus grand que le temps de déplacement entre des points cibles consécutifs. Selon les auteurs, le mouvement le long de ces points et la durée de pause relativement grande, réduisent considérablement l'overhead sur une partie du protocole de routage évitant ainsi les ajustements fréquents de routes causés par la mobilité du puits. Le puits en transit établit le lien avec les nœuds voisins via des beacons. Pour éviter la propagation des changements topologiques soudains et fréquents du puits mobile, MobiRoute ne propage la nouvelle position du puits dans le réseau que lorsque le puits arrive à un point cible. En effet,

pendant le déplacement, le puits peut passer par plusieurs nœuds et les liens avec eux peuvent ne plus être valides lorsque le puits arrive à sa prochaine destination.

Pour augmenter la durée de vie du réseau, MobiRoute utilise également un mécanisme de contrôle de mobilité adaptatif en définissant des profils énergétiques des différents segments du réseau. Ainsi, le puits évite l'arrêt à un point si son profil d'énergie est extrêmement faible. Cependant, la large propagation des mises à jour topologiques du puits au niveau du réseau déclenché par l'arrivée du puits à un nouveau point est consommateur en énergie.

★ Wang [51] exploite la mobilité des puits pour prolonger la durée de vie du réseau où le puits mobile se déplace autour d'un champ de capture et fait des pauses temporaires au niveau des nœuds placés à des points de la grille. Dans le schéma proposé, les nœuds capteurs sont supposés être placés de façon déterministe à des distances égales le long des points de la grille, où la grille est considéré comme bidirectionnelle ayant des cellules carrées de même taille. En outre, il suppose que les nœuds ont une taille de tampon illimitée et de communiquer périodiquement avec le puits en multi-saut où un saut est considéré comme la taille d'une cellule. Le puits se déplace le long des points de la grille pour prolonger la durée de vie du réseau. Pour ce faire, le puits fait une pause temporaire au niveau d'un nœud particulier selon l'énergie résiduelle de ce nœud. Afin de déterminer les nœuds candidats à visiter et la période de pause à ces nœuds, un modèle d'optimisation linéaire est adoptée dans le but de maximiser la durée de vie du réseau jusqu'à ce que le premier nœud dans le réseau meurt en raison de l'épuisement de son énergie. Par rapport au scénario du puits statique, le schéma proposé améliore la durée de vie du réseau fournissant ainsi une consommation d'énergie équilibrée entre les nœuds capteurs. Cependant, le déploiement déterministe des nœuds à des distances égales et l'hypothèse de taille du tampon illimité ne sont irréaliste dans la plupart des déploiements de réseaux de capteurs.

### 3.3 Synthèse et commentaires

Après avoir abordé les différents mécanismes de dissémination de données dans les RCSF à puits (s) mobile (s), il semble intéressant de récapituler les principaux éléments et facteurs à considérer dans une solution gérant la mobilité du puits dans les RCSF et de commenter leur impact sur cette dernière. Ces facteurs ainsi leurs effets sont les suivants :

- **Le modèle de mobilité :**

Le pattern de mobilité définit la trajectoire ou le chemin à suivre par le puits mobile. Il peut s'agir d'une ligne droite, un cercle, un hexagone... Dans le cas de la mobilité avec contrainte de chemin, un ensemble de nœuds ou sites à visiter dans le cas de mobilité sans contrainte de chemin ou que le mouvement soit contrôlé par l'observateur du réseau. Le mouvement du puits peut être discret ou continu. La plupart des schémas utilisent la mobilité discontinue afin de réduire l'overhead du au déplacement du puits.

- **Le nombre de puits mobiles :**

L'usage de plusieurs puits mobiles permet de réduire la consommation d'énergie ainsi que les délais et la perte de données (dus aux longues attentes du passage du puits) en affectant chaque puits à un segment particulier du réseau. Cependant, elle implique des coûts matériels importants et une complexité de planification pour assurer une grande collaboration. La collaboration est nécessaire afin d'éviter les chevauchements dans la couverture des différents segments qui risque de causer des collisions.

- **L'utilisation d'assistants :**

Certain schémas utilisent des assistants pour la collecte de données. Ces nœuds assistants peuvent être statiques ou mobiles. Les assistants statiques jouent le rôle de collecteurs locaux ou point de RDV et peuvent devenir ainsi des points chauds. Les assistants mobiles tentent d'assurer la couverture des différents segments pour réduire les délais et satisfaire les exigences des applications temps réel.

- **La vitesse du puits :**

La vitesse du puits dépend de l'entité (animal, humain, véhicule...) à laquelle le disposi-

Schéma de collecte de données	Containte de la mobilité du puits	Nombre de puits	Mode de transmission des données	Architecture du réseau	Mécanisme de contrôle du réseau	Esimation des messages de contrôle	Objectifs
MESS[31]	vitesse réduite du puits	Un seul	Proactif	Déploiement hétérogène des nœuds	Utilisant de multiples sous-puits statique	Faible	Equilibrer la durée de vie et la latence du réseau
VCCSR[33]	Mouvement le long d'un chemin circulaire en dehors du champ de capture	Un seul	Orienté requête	Déploiement des nœuds	Tous les CH structure virtuelle sont seulement informé	Moyenne	Prolonger la réseau
Whisper[34]	Vitesse constante le long d'une d'une ligne droite	Un seul	Orienté requête	Déploiement homogène des nœuds	suppose aucun changement de vitesse et de la direction du puits	Faible	Livraison garantie pour puits très rapide
[35]	Mouvement le long d'un chemin circulaire en dehors du champ de capture	Un seul	Orienté requête	Déploiement hétérogène des nœuds	Des mrrsages de requête ciblent	Faible	Réduire la latence

[36]	Un ensemble de trajectoire sont utilisées	Multiple	Proactif	Déploiement hétérogène des nœuds	Informar les nœuds sur ensemble de toutes les trajectoires possibles	Moyenne	Garantir la livraison
[37]	Mouvement à l'intérieur d'un environnement fermé	Un seul	Proactif	Déploiement homogènes des nœuds	Déclancher des mises à jour uniquement sur transition des nœuds relais	Elevée	Améliorer la performance de la livraison des données (fiabilité)
[38]	Vitesse constante de direction dans chaque phase	Multiple	Orienté requête	Déploiement homogènes des nœuds	Non spécifié	Fiable	Améliorer la livraison des données et la durée de vie du réseau
[39]	Mouvement lent le long du pas	Un seul	Proactif	Déploiement homogènes des nœuds	Supposer que les nœuds ont une connaissance partielle ou complète de la carte du puits	Faible	Equilibrer la durée de vie du réseau et la latence

TABLE 3.1 – Comparaison entre les schémas basés sur la mobilité avec containte de chemin

Schéma de collecte de données	Nombre de puits	Mode de transmission des données	Architecture du réseau	Mécanisme de contrôle du réseau	Esimation des messages de contrôle	Objectifs
DDRP [40]	Plusieurs	périodique	Déploiement homogène des nœuds	Mécanisme de sur écoute	Faible	Prolonger la durée de vie du réseau
[41]	Un seul	Réactif	Déploiement homogène des nœuds	Non précisé	Moyenne	Prolonger la durée de vie de réseau
[42]	Un seul	Réactif	Déploiement homogène des nœuds	Non précisé	Moyenne	Prolonger la durée de vie de réseau
[43]	Un seul	Proactif	Déploiement homogène des nœuds	Mécanisme entendant	Lente	Fiabilité des données avec une charge de contrôle du réseau minimal
[44]	Plusieurs	Orienté requête	Déploiement homogène des nœuds	Les puits mettent à jour seulement les anciens voisins	Moyenne	Améliorer la durée de vie du réseau

TABLE 3.2 – Comparaison entre les schémas basés sur la mobilité sans containte de chemin

Schéma de collecte de données	Contrainte de la mobilité du puits	Nombre de puits	Mode transmission de données	Architecture du réseau	Mécanisme de contrôle du réseau	Estimation des messages de contrôle du réseau	Objectifs
[45]	Visiter seulement un ensemble de CH	Multiples	Attendre et déposer	Déploiement homogène des nœuds	Les mises à jours que lorsque le puits à n'importe CHs	Moyenne	Equilibrer la durée de vie et la latence du réseau
[46]	Modèle de mobilité discrète	Un seul	Attendre et déposer	Déploiement homogène des nœuds	Non spécifié	Fiable	Equilibrer la consommation d'énergie et la latence
MSRP [47]	Déplacement vers des zones riches en énergie	Un seul	Attendre et déposer	Déploiement homogène des nœuds	Non spécifié	Moyenne	Prolonger la durée de vie de réseau
[48]	Déplacement vers des zones riches en énergie ou source d'évènement	Un seul puits statique et plusieurs sous puits mobiles	Périodique	déploiement hétérogène des nœuds	Délimité par une zone couverte par chaque sous puits mobile	Fiable	Améliorer la durée de vie de réseau tout en fournissant des données en temps réel
GMRE [49]	Modèle de mobilité discrète	Un seul	Périodique et proactif	Déploiement homogène des nœuds	Imposer un intervalle de pause minimum à chaque point de séjour	Fiable	Prolonger la durée de vie de réseau et le délai
Mobi-Route [50]	Modèle de mobilité discrète	Un seul	Proactif	Déploiement homogène des nœuds	imposer un grand intervalle de pause	Fiable	Améliorer la durée de vie de réseau
[51]	Modèle de mobilité discrète	Un seul	Périodique et proactif	Déploiement homogène des nœuds	Imposer un grand intervalle de pause	Fiable	Prolonger la durée de vie de réseau

TABLE 3.3 – Comparaison entre les schémas basés sur la mobilité contrôlée

tif est attaché. Le puits peut se déplacer à une vitesse fixe ou variable, à petite, moyenne ou grande vitesse. Ce paramètre affecte considérablement la politique de collecte. En effet, une petite vitesse cause des délais importants et une perte de données tandis d'un mouvement rapide engendre une perte d'énergie dans la mise à jour des routes à cause des fréquents changements topologiques.

● **La taille du réseau :**

La taille du réseau est le nombre total des nœuds constituant ce dernier. Il dépend du type de l'application et de l'environnement. Les études ont montré que la mobilité contrôlée donne de meilleurs résultats pour les réseaux de petite taille.

● **La localisation géographique :**

L'information de localisation apporte les avantages suivants :

- Une économie de l'énergie devant être dépensée dans la découverte des routes vers le puits mobile .
- Un gain en espace mémoire devant être utilisé pour le stockage des tables de routage .
- Une meilleure formation des clusters et désignation des CH .
- Limiter la propagation des MAJ topologiques à certains nœuds (eg : nœuds récemment visités ne seront pas concernés) si la position du puits et le temps d'arrivée sont prévisibles.
- Eviter des visites répétées du même site.

Malgré tous ces avantages, le mécanisme de localisation impose des contraintes matérielles (GPS) ou logicielles (algorithmes) supplémentaires. Le GPS est consommateur en énergie et impose des coûts additionnels tandis que les algorithmes de localisation sont basés sur l'échange de bacons ce qui augmente l'overhead.

● **Mode de délivrance de données :**

Pour disséminer les données vers le puits mobile, cinq modes peuvent être choisis : attendre et déposer, proactif, réactif, périodique et orienté requêtes.

- En mode attendre et déposer, les nœuds cachent leurs données et attendent la détection

du voisinage du puits mobile pour les transmettre.

-L'approche proactive est adoptée quand les routes sont préalablement connues et les paquets sont transmis vers le(s) puits ou sont temporairement stockés au niveau de certains nœuds pour être traités ultérieurement.

-En mode réactif, les chemins ne sont pas connus d'avance mais sont découverts lorsqu'un événement est survenu. Il est adaptée aux applications temps réel .

-En mode périodique, les nœuds capturent et transmettent les données périodiquement.

-La dissémination orienté requête opère lorsque le nœud reçoit une requête du puits.

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni un riche état de l'art des politiques de collecte/dissémination de données utilisant les station(s) de base mobile(s) pour faire face aux problèmes des RCSF. En se basant sur les modèles de mobilité du puits, ces systèmes ont été classés en trois catégories. Nous avons remarqué que la plupart de ces schémas visent à prolonger la durée de vie du réseau tandis que d'autres tentent à minimiser la latence ou assurer la fiabilité. La latence est allégée en utilisant plusieurs puits mobiles, modèle de mobilité contrôlée ou avec l'usage de nœuds assistants comme points de RDV. Chaque solution 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.

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF ou WSN Wireless Sensor Network) sont devenus de plus en plus populaires grâce aux grandes avancées dans le domaine de la microélectronique qui ont réduit le coût de fabrication des nœuds de capteurs d'une manière considérable. Ces réseaux ont montré leur efficacité dans le suivi et le contrôle à distance de l'environnement physique avec une meilleure précision. Actuellement ils sont exploités pour différents domaines d'applications tels l'observation de l'environnement naturel (*pollution, inondation, ...etc.*)

Le succès des réseaux de capteurs sans fil est fondé sur la simplicité des nœuds capteurs (*faible puissance de calcul, petite batterie, antenne radio à portée limitée...*). Cependant, ce point fort des RCSFs représente également leur contrainte la plus imposante. En effet, la limitation des ressources des nœuds capteurs engendre plusieurs défis de conception, dont l'économie d'énergie et le plus important.

L'utilisation de la mobilité du puits afin de prolonger la durée de vie du réseau a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. En effet, l'utilisation d'un puits mobile illimité en énergie et en ressources a montré ses preuves dans l'équilibrage de charge, l'amélioration de la connectivité et une meilleure sécurité par rapport à un RCSF avec une station statique.

Cependant, l'introduction de cette mobilité induit plusieurs problèmes supplémentaires du fait des changements topologiques fréquents qui suivent chaque déplacement de la station de base. Ainsi, les messages de contrôle nécessaires pour la découverte et la mise à jour des routes vers la nouvelle position du puits mobile constituent un flux de données non négligeable. Un nœud source et selon la stratégie définie par le concepteur de la solution, peut attendre long-

temps pour détecter une route valide vers le puits ce qui engendre des délais importants et voir des pertes de données si le puits tarde beaucoup ou que sa durée de séjour n'est pas suffisante pour collecter toutes les données du nœud source.

L'apport principal de ce mémoire est l'élaboration d'une étude comparative des principaux mécanismes de collecte de données capturées par les différents nœuds. Ces données qui doivent être transmises vers un ou plusieurs puits mobiles. Le schéma de collecte doit alors prendre en considération plusieurs facteurs tels que le type de l'application, l'architecture du réseau, le mécanisme de détection du puits mobile, qui initie la communication? (*nœud ou puits*), où seront sauvegardées les données à transmettre? (*nœud, collecteur mobile, cluster head...*)

### Synthèse

Tout d'abord, nous avons introduit les RCSF dans le cas général afin de comprendre leur spécificités, leur apports, leur caractéristiques ainsi que leur principales limites. Ceci a fait l'objet du chapitre 1.

Ensuite nous avons présenté l'intérêt que peut apporter la mobilité de la station de base pour résoudre les problèmes des RCSF utilisant une seule station statique. Les patterns (modèles) de mobilité les plus utilisés dans le domaine sont présentés dans le chapitre 2. Un modèle de mobilité définit généralement la trajectoire du puits (ligne droite, cercle, carré... ou juste un ensemble de sites), l'ordre de passage, la durée de séjour et le temps de déplacement. Ces modèles sont pratiquement ceux utilisés pour les réseaux ad-hoc et doivent être adaptés aux spécificités des RCSF.

Si le modèle de mobilité s'intéresse au chemin à emprunter par le puits mobile, le schéma de collecte définit quand et comment seront transmises les données capturées par chaque nœud vers le(s) station(s) de base mobile(s). Une étude exhaustive sur les solutions de collecte a fait l'objet du chapitre 3. Ces schémas ont été classés selon les trois modèles de mobilité définis dans le chapitre 2.

Ce travail nous a permis de prendre connaissance des différents éléments clef et facteurs à considérer lors de la conception d'une solution exploitant la mobilité du puits dans les RCSF. Nous souhaitons qu'il servira de référence pour les travaux de recherche qui s'inscrivent dans cet axe et qu'il sera enrichi par l'étude d'autres modèles et protocoles.

---

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. *Wireless sensor networks : a survey*. *Computer Networks (Elsevier)*, vol.38, no.4, pp.393-422, March 2002.
- [2] *International Journal of Application and Innovation in Engineering Management* , Vol. 3, Issue 3, March 2014.
- [3] Vernon S.Somerset , *"Intelligent and Biosensors, Edited by Vernon S.Somerset "* , Intech, Januray 2010.
- [4] F.Brissaud, D.Charpentier, A.Barros et C.Bérenguer, *"capteurs intelligents :nouvelles technologies et nouvelles problématiques pour la sureté de fonctionnements"*, Maitrise des risques et de sureté de fonctionnement.Cambda-mu16 , Avignon :France (2008).
- [5] Juillet 2009, *réseaux de capteurs sans fil, mise à jour 2012*, wikipedia.org/wiki/Réseau\_de\_capteurs\_sans\_fil.
- [6] DHIB Eya, 2007, *Routage avec QoS temps réel dans les réseaux de capteurs*, RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES, École supérieure des communications, Tunis.
- [7] M. Ilyas and I. Mahgoub. *Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems* , ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.

- [8] KAHN Patrice, PERSON-SILHOL Dominique et VASSEUR Dominique. Anticipation, innovation, perception : *Des défis pour la maîtrise des risques à l'horizon 2020*. Editeur : Paris : Ed.TECHNIQUE DOCUMENTATION, Edition SRD, lavoisier, pages 64 – 67, ISBN : 978 – 2 – 7430 – 1295 – 3, septembre 2010.
- [9] K.Holger and Andreas Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, ISBN : 978 – 0 – 470 – 09510 – 2, Wiley, 2005.
- [10] Q. Wang et I. Balasingham. *Wireless Sensor Networks - An Introduction, Chapter 1 in Wireless Sensor Networks : Application-centric Design*, book edited by Geoff V Merreh and Yen Kheng Tan (Ed.) ISBN : 978 – 953 – 307 – 321 – 7, In Tech, 2010.
- [11] A.Montagne ,D.C.Restrepo et D.A.Ovalle, "*Artificial Intelligence for Wireless Sensor Networks Enhancement*", Intech, 2010.
- [12] Y. Younes. *Minimisation d'énergie dans un réseau de capteur*. mémoire de magister, université mouloud mammeri de tizi ouzou, soutenu le 26/09/2012.
- [13] Shio Kumar Singh et al. *Applications , classifications and Selectionsof Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks*. International Journal of advanced engineering sciences and technologies ( IJAEST), Volume 1, Issue 2, pages 85 – 95,2011.
- [14] Javad Rezazadeh, Marjan Moradi, Abdul Samad Ismail. *Mobile WirelessSensor Networks Overview*. IJCCN International Journal of Computer Communications and Networks , Volume 2, Issue 1, pages 17 – 22, February 2012.
- [15] Chun-Hsien Wu, Yeh-Ching Chung. *Heterogeneous Wireless Sensor Network Deployment and Topology Control Based on Irregular Sensor Model*. In proceedings of Second International Conference (GPC 2007), Paris, France, pages 78 – 88, ISBN : 978 – 3 – 540 – 72359 – 2, 2007.
- [16] I.F. Akyildiz, W.Su ,Y.Sankarasubramaniam, E.Cayirci. *Wireless sensor networks : a survey*. Computer Networks : The International Journal of Computer and Telecommuni-

cations Networking, Volume 38, No 4, pages 393 – 422, 2002.

- [17] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. *Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks*. In Proceedings of the 33 rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.
- [18] G. Pottie, W. Kaiser. *Wireless integrated network sensors*. In Communication of ACM magazine. Volume 43, No 5, pages 51 – 58, 2000.
- [19] E.H.SMarour Diop *”optimisation de la transmission d’image dans les réseaux de capteurs”*Thèse en Cotutelle de doctorat en science : université de Pau France et université Gaston Berger de saintlouis Sénégal.juin 2014.
- [20] C. C. Shen, C. Srisathapornphat, and C. Jaikaeo. *Sensor information networking architecture, and applications*. IEEE Personal Communications, pages 52 – 59, August 2001.
- [21] Di Francesco, M. ; Das, S.K. ; Anastasi, G. *Data collection in wireless sensor networks with mobile elements : A survey*. ACM Trans. Sens. Netw. TOSN 2011, 8.
- [22] Kinalis, A. ; Nikoletseas, S. ; Patroumpa, D. ; Rolim, J. *Biased sink mobility with adaptive stop times for low latency data collection in sensor networks*. Inf. Fusion 2012, 15, 56 – 63.
- [23] Luo, J. ; Panchard, J. ; Piórkowski, M. ; Grossglauser, M. ; Hubaux, J.P. *Mobiroute : Routing towards a Mobile Sink for Improving Lifetime in Sensor Networks*. In Proceedings of the Distributed Computing in Sensor Systems, San Francisco, CA, USA, 18 – 20 June 2006 ; pp. 480 – 497.
- [24] Di Francesco, M. ; Das, S.K. ; Anastasi, G. *Data collection in wireless sensor networks with mobile elements : A survey*. ACM Trans. Sens. Netw. TOSN 2011, 8.
- [25] Chatzigiannakis, I. ; Kinalis, A. ; Nikoletseas, S. *Efficient data propagation strategies in wireless sensor networks using a single mobile sink*. Comput. Commun. 2008, 31, 896 – 914.

- [26] Yang, X.; Vaidya, N.H. *A Wakeup Scheme for Sensor Networks : Achieving Balance between Energy Saving and End-to-End Delay*. In Proceedings of the 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, Toronto, ON, Canada, 25 – 28 May 2004; pp. 9 – 26.
- [27] Zhao, W.; Ammar, M.; Zegura, E. *A Message Ferrying Approach for Data Delivery in Sparse Mobile Ad Hoc Networks*. In Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, Tokyo, Japan, 24 – 26 May 2004; pp. 187 – 198.
- [28] Schurgers, C.; Tsiatsis, V.; Ganeriwal, S.; Srivastava, M. *Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space*. IEEE Trans. Mob. Comput. 2002, 1, 70 – 80.
- [29] Chatzigiannakis, I.; Kinalis, A.; Nikolettseas, S. *Sink Mobility Protocols for Data Collection in Wireless Sensor Networks*. In Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access, Torremolinos, Spain, 2-6 October 2006; pp. 52-59.
- [30] Khan, M.I.; Gansterer, W.N.; Haring, G. *Congestion avoidance and energy efficient routing protocol for wireless sensor networks with a mobile sink*. J. Netw. 2007, 2, 42-49.
- [31] Tang, B.; Wang, J.; Geng, X.; Zheng, Y.; Kim, J.U. *A novel data retrieving mechanism in wireless sensor networks with path-limited mobile sink*. Int. J. Grid Distrib. Comput. 2012, 5, 133-140.
- [32] Ben H.E.; Chelius, G. *A Line-Based Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks with Mobile Sink*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'08), Beijing, China, 19-23 May 2008; pp. 2201-2205.
- [33] Chen, T.S.; Tsai, H.W.; Chang, Y.H.; Chen, T.C. *Geographic convergecast using mobile sink in wireless sensor networks*. Comput. Commun. 2013, 36, 445-458.

- [34] Oliveira, H.A. ; Barreto, R.S. ; Fontao, A.L. ; Loureiro, A.A.F. ; Nakamura, E.F. *A Novel Greedy forward Algorithm for Routing Data toward a High Speed Sink in Wireless Sensor Networks*. In Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), Zurich, Switzerland, 2-5 August 2010 ; pp. 1-7.
- [35] Tacconi, D. ; Miorandi, D. ; Carreras, I. ; Chiti, F. ; Fantacci, R. *Using wireless sensor networks to support intelligent transportation systems*. *Ad Hoc Netw.* 2010, 8, 462-473.
- [36] Lee, H. ; Wicke, M. ; Kusy, B. ; Gnawali, O. ; Guibas, L. *Data Stashing : Energy-Efficient Information Delivery to Mobile Sinks through Trajectory Prediction*. In Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Stockholm, Sweden, 12-16 April 2010 ; pp. 291-302.
- [37] Kusy, B. ; Lee, H. ; Wicke, M. ; Milosavljevic, N. ; Guibas, L. *Predictive QoS Routing to Mobile Sinks in wireless sensor networks*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN, 2009), San Francisco, CA, USA, 13-16 April 2009 ; pp. 109-120.
- [38] Ma, J. ; Chen, C. ; Salomaa, J.P. *mWSN for large scale mobile sensing*. *J. Signal Process. Syst.* 2008, 51, 195-206.
- [39] Akkaya, K. ; Younis, M. *Energy-aware delay-constrained routing in wireless sensor networks*. *SInt. J. Commun. Syst.* 2004, 17, 663-668.
- [40] Shi, L. ; Zhang, B. ; Mouftah, H.T. ; Ma, J. *DDRP : An efficient data-driven routing protocol for wireless sensor networks with mobile sinks*. *Int. J. Commun. Syst.* 2013, 26, 1341-1355.
- [41] Tashtarian, F. ; Moghaddam, M.H.Y. ; Effati, S. *Energy Efficient Data Gathering Algorithm in Hierarchical Wireless Sensor Networks with Mobile Sink*. In Proceedings of the 2nd International IEEE eConference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), city, Iran, 2012 ; pp. 232-237.

- [42] Zungeru, A.M. ; Ang, L.M. ; Seng, K.P. Termite-Hill : *Routing towards a Mobile Sink for Improving Network Lifetime in Wireless Sensor Networks*. In Proceedings of the Third International IEEE Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), Kota Kinabalu, Malaysia, 8-10 February 2012 ; pp. 622-627.
- [43] Yu, F. ; Park, S. ; Lee, E. ; Kim, S.H. Elastic routing : *A novel geographic routing for mobile sinks in wireless sensor networks*. IET Commun. 2010, 4, 716-727.
- [44] Kim, H.S. ; Abdelzaher, T.F. ; Kwon, W.H. *Minimum-Energy Asynchronous Dissemination to Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks*. In Proceedings of the ACM 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, CA, USA, 5-7 November 2003 ; pp. 193-204.
- [45] Aioffi, W.M. ; Valle, C.A. ; Mateus, G.R. ; da Cunha, A.S. *Balancing message delivery latency and network lifetime through an integrated model for clustering and routing in wireless sensor networks*. Comput. Netw. 2011, 55, 2803-2820.
- [46] Kinalis, A. ; Nikolettseas, S. ; Patroumpa, D. ; Rolim, J. *Biased sink mobility with adaptive stop times for low latency data collection in sensor networks*. Inf. Fusion 2012, 15, 56-63.
- [47] Nazir, B. ; Hasbullah, H. *Mobile Sink Based Routing Protocol (MSRP) for Prolonging Network Lifetime in Clustered Wireless Sensor Network*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE), Kuala Lumpur, Malaysia, 5-8 December 2010 ; pp. 624-629.
- [48] Banerjee, T. ; Xie, B. ; Jun, J.H. ; Agrawal, D.P. *Increasing lifetime of wireless sensor networks using controllable mobile cluster heads*. Wirel. Commun. Mob. Comput. 2010, 10, 313-336.
- [49] Basagni, S. ; Carosi, A. ; Melachrinoudis, E. ; Petrioli, C. ; Wang, Z.M. *Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime*. Wirel. Netw., 2008, 14, 831-858.

- [50] Luo, J.; Panchard, J.; Piórkowski, M.; Grossglauser, M.; Hubaux, J.P. *Mobiroute : Routing towards a Mobile Sink for Improving Lifetime in Sensor Networks*. In *Proceedings of the Distributed Computing in Sensor Systems, San Francisco, CA, USA, 18-20 June 2006*; pp. 480-497.
- [51] Wang, Z.M.; Basagni, S.; Melachrinoudis, E.; Petrioli, C. *Exploiting Sink Mobility for Maximizing Sensor Networks Lifetime*. In *Proceedings of the 38th Annual IEEE Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'05), Big Island, HI, USA, 3-6 January 2005*.
- [52] Feo, T.A.; Resende, M.G. *Greedy randomized adaptive search procedures*. *J. Glob. Optim.* 1995, 6, 109-133.
- [53] Hoos, H.H.; Stützle, T. *Stochastic Local Search : Foundations Applications*; Morgan Kaufmann Publishers : San Francisco, CA, USA, 2004.
- [54] Kredó, K., II; Mohapatra, P. *Medium access control in wireless sensor networks*. *Comput. Netw.* 2007, 51, 961-999.
- [55] Karp, B.; Kung, H.T. *GPSR : Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks*. In *Proceedings of the ACM 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, MA, USA, 6-11 August 2000*; pp. 243-254.

## RÉSUMÉ

L'exploitation de la mobilité pour les réseaux sans fils est devenue une issue importante et a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche que ça soit pour les réseaux adhoc, les réseaux méchés ainsi que les réseaux véhiculaires. Récemment, il ya une tendance à utiliser la mobilité pour alléger le trafic et équilibrer la charge afin d'améliorer la consommation énergétique dans les RCSF. Dans un scénario de mobilité, les nœuds doivent garder trace de la dernière position de la station de base afin de lui délivrer les données capturées. Cependant, les changements topologiques affectent la consommation de l'énergie et devraient être contrôlés. L'objectif principal de ce travail est l'élaboration d'une étude comparative des principaux mécanismes de collecte de données dans les RCSF à puits mobile(s). Le schéma de collecte doit alors prendre en considération plusieurs facteurs tels que le type de l'application, l'architecture du réseau, le mécanisme de détection du puits mobile, mode de délivrance des données...

**Mots clefs** : RCSF, puits mobiles, modèle de mobilité, collecte de données.

## ABSTRACT

Mobility management is one of the most important issues in wireless networks, and thus it has received extensive research efforts in different areas of wireless networks such as mobile ad hoc network (MANET), wireless mesh network (WMN), and vehicular ad hoc network (VANET). Recently, there is a trend to investigate mobility as a means of relieving traffic burden and enhancing energy efficiency in wireless sensor network (WSN). In mobility scenarios, nodes need to keep track of the latest location of mobile sinks for data delivery. However, frequent propagation of sink topological updates undermines the energy conservation goal and therefore should be controlled. In this work, we provide a comparative study of data collection/dissemination schemes in WSN using sink mobility. The scheme must take in account many factors as the application type, network architecture, sink detection mechanism, data reporting mode...

**Keywords** : WSN, sink mobility, mobility pattern, data collection.