

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



Université A/Mira de Béjaïa
Faculté des Sciences Exactes
Département d'Informatique

MÉMOIRE DE MASTER PROFESSIONNEL

En Informatique

Option : *Administration et Sécurité des Réseaux*

Thème

**Étude des approches de détection des trous de
couverture dans les réseaux de capteurs sans fil
(RCSFs)**

Réalisé par :

M^{elle} BENBEKA Siham

M^{elle} BENKHELLAT Drifa

Soutenu le 23 septembre 2020 devant le jury composé de :

Président	M. KHANOUCHE Mohamed Essaid	MCA	U. A/Mira Béjaïa.
Promotrice	Mme. MEZEGHRANE-LARBI Wahiba	MCB	U. A/Mira Béjaïa.
Co-promoteur	M. LARBI Ali	MCB	U. A/Mira Béjaïa.
Examinatrice	Mme. MAMMERI Karima	MAA	U. A/Mira Béjaïa.

Béjaïa, 2020.

※ *Remerciements* ※

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous a donné le courage, la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Premièrement, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu être réalisé sans l'aide et les conseils de Mme. MEZEGHRANE-LARBI Wahiba. Nous la remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience et sa disponibilité, ses qualités pédagogiques et humaines, et ses compétences nous apportés un encadrement déterminant dans toutes les phases de ce travail. Qu'elle trouve ici le témoignage de notre profond respect.

Nos remerciements vont aussi à notre Co-encadrant M. LARBI Ali, pour sa gentillesse, sa disponibilité et l'aide précieuse qu'il nos a apportés. Sa compréhension, son soutien et son suivi permis de mener à bien ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de nos sincères gratitude.

Nous adressons nos sincères remerciements à chacun des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous remercions nos familles respectives et particulièrement nos parents pour leurs soutiens qu'ils nous ont accordés tout au long de notre chemin.

Nous remercions tout nos enseignants du département informatique de l'université ABDR-RAHMANE MIRA DE BEJAIA.

Nous remercions enfin toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

※ *Dédicaces* ※

À la lumière de mes jours, source de mes efforts, de la flamme de mon cœur, de ma vie et de mon bonheur, qu'Allah vous donne bonne santé et longue vie, mère que j'aime.

À mon modèle de courage et de sacrifices. Tout au long de sa vie, il n'a su ménager ses efforts pour notre bien, qu'Allah vous donne une bonne santé et une longue vie, à vous mon père.

À mes charmantes sœurs Dida et lilli, mes frères lyes et amirouche, je dédie ce travail dont le grand plaisir leur vient principalement pour leurs conseils et leurs encouragements.

À ma binôme Drifa et à toute la famille BENKHELLAT.

Aux personnes qui m'ont toujours aidée et encouragée, qui ont toujours été à mes côtés, et qui m'ont accompagnée durant mes chemins d'études supérieurs, collègues d'étude, à mes sœurs de cœurs Faiza, Nadjet, Macilia et mes amis Amine, Habib, Younes et Fatah.

BENBEKA Siham

✧ *Dédicaces* ✧

À la lumière de mes jours, source de mes efforts, de la flamme de mon cœur, de ma vie et de mon bonheur, qu'Allah vous donne bonne santé et longue vie, mère que j'aime.

À mon modèle de courage et de sacrifices. Tout au long de sa vie, il n'a su ménager ses efforts pour notre bien, qu'Allah vous donne une bonne santé et une longue vie, à vous mon père.

A mes frères adorés Idir, Loucif, Ghano, Marouane qui m'ont apporté chaque jour un soutien indéniable.

À ma binôme Siham et à toute la famille BENBEKA

Aux personnes qui m'ont toujours aidée et encouragée, qui ont toujours été à mes côtés, et qui m'ont accompagnée durant mes chemins d'études supérieures, collègues d'étude, à mes sœurs de cœurs Macilia et Sylia et mes amis Younes et Fatah.

BENKHELLAT Drifa

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des algorithmes	vii
Liste des abréviations	viii
Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	3
1.1 Introduction	3
1.2 Réseaux sans fil	3
1.2.1 Réseaux ad hoc	3
1.2.2 Réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)	4
1.2.2.1 Définition d'un nœud capteur	4
1.2.2.2 Architecture d'un capteur	5
1.2.2.3 Zone de couverture / Zone de communication	6
1.2.2.4 Définition et architecture d'un RCSF	7
1.2.2.5 Caractéristiques des RCSFs	7
1.2.3 Comparaison entre les RCSFs et les réseaux Ad hoc	8
1.2.4 Architectures de communication dans les RCSFs	9
1.2.4.1 Architecture à plat	9
1.2.4.2 Architecture hiérarchique	10
1.2.5 Pile protocolaire dans un RCSF	10

1.2.5.1	Couche physique	11
1.2.5.2	Couche liaison de données	11
1.2.5.3	Couche réseau	12
1.2.5.4	Couche transport	12
1.2.5.5	Couche application	12
1.2.5.6	Couche de gestion d'énergie	12
1.2.5.7	Couche de gestion de mobilité	13
1.2.5.8	Couche de gestion des tâches	13
1.2.6	Domaines d'application des RCSFs	13
1.2.6.1	Applications militaires	13
1.2.6.2	Applications médicales	13
1.2.6.3	Applications environnementales	14
1.2.6.4	Applications commerciales	14
1.2.6.5	Applications à la sécurité	14
1.2.7	Facteurs et contraintes des RCSFs	15
1.2.7.1	Passage à l'échelle (scalabilité)	15
1.2.7.2	Coût de production	15
1.2.7.3	Environnement	15
1.2.7.4	Topologie du réseau	15
1.2.7.5	Connectivité	16
1.2.7.6	Couverture	16
1.2.7.7	Durée de vie	16
1.2.7.8	Qualité de service	16
1.2.7.9	Sécurité limitée	16
1.2.7.10	Consommation d'énergie	17
1.3	Conclusion	17
2	État de l'art sur les approches de détection des trous de couverture	18
2.1	Introduction	18
2.2	La couverture dans les RCSFs	18
2.2.1	Critères de classifications de la couverture	19
2.2.1.1	Méthodes de déploiement des capteurs	19
2.2.1.2	Relation entre les rayons de capture et de communication	19

2.2.1.3	L'énergie	19
2.2.1.4	La connectivité	19
2.2.1.5	Caractéristiques des algorithmes utilisés	19
2.2.2	Types de couverture	20
2.2.2.1	Couverture de zone	20
2.2.2.2	Couverture de points	20
2.2.2.3	Couverture de barrière	21
2.2.3	Ordonnancement d'activités dans les RCSFs	21
2.2.4	Gestion de l'ordonnancement	21
2.2.4.1	Approche centralisée	22
2.2.4.2	Approche hiérarchique	22
2.2.4.3	Approche localisée	23
2.3	Étude de quelques protocoles de détection et de correction des trous de couverture	23
2.3.1	Définition d'un trou	23
2.3.2	Classification des algorithmes de détection et de correction des trous de couverture	24
2.3.2.1	Les méthodes géométriques	25
2.3.2.2	Les méthodes statistiques	29
2.3.2.3	Les méthodes topologiques	30
2.4	Comparaison des protocoles de détection et de correction des trous de couverture	33
2.4.1	Connaissance des positions	33
2.4.2	Découverte des voisins	33
2.4.3	Détection des trous	34
2.4.4	Correction des trous	34
2.4.5	Homogénéité	34
2.4.6	Type de protocole	34
2.5	Discussion	35
2.6	Conclusion	36
3	Proposition d'une approche de détection des trous de couverture dans les RCSFs	37
3.1	Introduction	37
3.2	Motivation	37

3.3	Propriétés du réseau et hypothèses	38
3.4	Notre protocole de détection des trous	38
3.4.1	Quelques définitions	38
3.4.2	Fonctionnement générale de notre proposition	40
3.4.3	La phase de balayage du réseau pour l'identification des segments non-couverts	42
3.4.4	La phase de détection des trous	43
3.4.5	La phase de fusion des trous	45
3.5	Conclusion	46
4	Simulation et évaluation des performances	47
4.1	Introduction	47
4.2	Environnement de la simulation	47
4.3	Paramètres de simulation	48
4.3.1	Critères de simulation	48
4.4	Résultats de simulation	49
4.4.1	Temps d'exécution	51
4.4.2	Nombre de trous	52
4.4.3	Taux d'erreur de détection	53
4.5	Conclusion	53
	Conclusion et perspectives	54
	Bibliographie	56

Table des figures

1.1	Réseau sans fil ad hoc.	4
1.2	Exemple d'un nœud capteur.	5
1.3	Architecture d'un capteur sans fil	6
1.4	Les rayons de couverture/communication d'un capteur.	6
1.5	Architecture d'un réseau de capteurs [15].	7
1.6	Architecture à plat d'un RCSF.	9
1.7	Architecture hiérarchique d'un RCSF.	10
1.8	Pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil [10].	11
1.9	Domaines d'application des réseaux de capteurs.	14
2.1	Exemple de couverture d'une zone	20
2.2	Exemple de couverture de points	20
2.3	Exemple d'une couverture de barrière	21
2.4	Trois approches algorithmiques pour l'ordonnancement d'activités.	22
2.5	Classification des algorithmes de détection / correction des trous de couverture.	25
3.1	Organigramme général de notre approche de détection des trous.	41
3.2	Illustration de la phase de balayage.	42
3.3	Exemple illustratif avant/après la fusion des trous	45
4.1	Déploiement aléatoire de 100 nœuds.	49
4.2	Exemples des trous détectés par notre approche.	49
4.3	Variation du taux d'erreur Vs Pas.	50
4.4	Variation du temps d'exécution Vs Nombre de nœuds déployés.	51
4.5	Nombre de trous Vs Nombre de nœuds déployés.	52
4.6	Taux d'erreur de détection Vs Nombre de nœuds déployés.	53

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs [16].	9
2.1	Tableau Comparatif des protocoles étudiés.	35
3.1	Différentes notations utilisées dans l'approche proposée.	40
4.1	Paramètres de simulation.	48

Liste des algorithmes

- 1 Identification des segments non-couverts 43
- 2 Construction de l'ensemble des segments adjacents non couverts 44
- 3 Construction du trou 44
- 4 Construction de tous les trous du réseau 45
- 5 Fusion des trous 46

Liste des abréviations

3HA	H ybrid H ole H ealing A lgorithm
ADCs	A nalog to D igital C onverters
BCP	B oundary C ritical P oints
BDCIS	B oundary D etection algorithm based on C onected I ndependent S ets
BRGT	B oundary R ecognition via G raph- T heory
CH	C luster- H eads
DBN-CH	D etecting B oundary N odes and C overage H oles
DSCS	D istributed S ector C over S canning
DW	D irectional W alk
GPS	G lobal P ositioning S ystem
HACH	H ealing A lgorithm of C overage H ole
MAC	M edia A ccess C ontrol
MANETS	M obile A d hoc N ETworks
Rc	R ayon de C ommunication
RCSF	R éseau de C apteurs S ans F il
Rs	R ayon de d étection
SB	S tation de B ase
TELC	A T ime and E nergy efficient protocol for L ocating C overage holes
TELPAC	A T ime and E nergy efficient protocol for L ocating and P atching C overage holes
UDG	U nit D isc G raph model
WSN	W ireless S ensors N etworks

Introduction générale

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est composé d'un grand nombre de nœuds capteurs caractérisés par leur petite taille et leur énergie limitée [1]. Ces nœuds capteurs collaborent entre eux pour surveiller une zone d'intérêt et observer un événement particulier. Les réseaux de capteurs sans fil sont largement utilisés dans divers domaines et applications telles que la santé, la domotique, les applications scientifiques, environnementales et militaires.

La couverture dans les RCSFs peut être considérée comme une qualité de service fournie par les différents capteurs du réseau, elle représente la capacité des capteurs à observer une zone d'intérêt [2]. En plus de la couverture, il est important que le réseau maintienne sa connectivité, afin de permettre à tout capteur du réseau de transmettre les données récoltées jusqu'à la station de base pour traitement. En raison du déploiement aléatoire de nœuds capteurs, une défaillance des nœuds ou la présence d'un obstacle environnemental (bâtiment, lac...) il est difficile d'avoir un réseau de capteurs avec une couverture à 100%, et de maintenir ce taux pendant toute la durée de vie du réseau. Des trous de couverture peuvent se former dans le réseau, laissant des zones non couvertes et parfois peuvent créer des ensembles de nœuds isolés. Ce phénomène affecte la couverture du réseau et peut également provoquer l'échec des algorithmes de routage. C'est pour cette raison que les trous de couverture doivent être détectés dès leur apparition, pour ainsi prendre les mesures nécessaires. Ces trous pourraient être réparées par un ajout incrémentiel de nouveaux capteurs [3]. Beaucoup d'effort ont été fournis dans ce sens, pour proposer des solutions à la détection et la réparation des trous de couverture dans les RCSFs.

Dans ce contexte, nous proposons une nouvelle approche centralisée pour détecter les trous de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil. Notre algorithme se base sur un balayage logique de toute la surface de la zone d'intérêt avec une droite parallèle à l'axe des ordonnées pour retrouver les segments non-couverts. Notre approche se déroule en trois phases : la première consiste à faire un balayage pour identifier les segments non-couverts, la deuxième phase est dédiée à la détection des trous et la dernière phase se concentre sur la fusion des trous adjacents.

Notre mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre fera l'objet d'une présentation détaillée des réseaux de capteurs sans fil : leurs architectures, leurs principales caractéristiques, leurs domaines d'application ainsi que les contraintes de conception d'un tel type de réseau.

Dans **le deuxième chapitre**, nous étudierons le problème de la couverture, les types de couverture, ainsi que les mécanismes d'ordonnancement d'activité, avec une description de quelques protocoles de détection et de correction des trous de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil proposés dans la littérature.

Le troisième chapitre sera consacré à une description détaillée de notre approche de détection des trous de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil.

Le quatrième chapitre, quant à lui, sera consacré à la simulation de l'approche proposée où des résultats de comparaison seront présentés.

Enfin, notre travail s'achève par une conclusion générale résumant les grands points qui ont été abordés ainsi que les perspectives que nous souhaitons accomplir prochainement.

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSFs) ou Wireless Sensor Networks (WSN) en anglais sont considérés comme un type particulier de réseaux ad hoc. Les nœuds de ce type de réseaux consistent en un grand nombre de capteurs capables de s'auto-organiser, de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome.

Dans ce chapitre, nous allons faire un survol des RCSFs en commençant par quelques définitions de base à savoir les composants d'un capteur, les architectures de communication dans les RCSFs, leurs domaines d'application et leurs contraintes conceptuelles.

1.2 Réseaux sans fil

Un réseau sans fil est un réseau informatique qui connecte différents postes ou systèmes entre eux par des ondes radios. Les réseaux sans fil peuvent avoir une classification selon le critère de l'infrastructure, nous distinguons alors deux catégories : réseaux avec infrastructure (réseaux cellulaires) et réseaux sans infrastructure (réseaux Ad hoc).

1.2.1 Réseaux ad hoc

Les réseaux ad hoc sont des réseaux sans fil composés d'éléments appelés hôtes ou nœuds. Ces nœuds communiquent entre eux en mode pair-à-pair et sont capables de s'auto-organiser sans infrastructure définie préalablement et sans aucune administration centralisée, par exemple un point d'accès dans les réseaux sans fil ou un routeur dans les réseaux câblés (voir figure 1.1). Les réseaux ad hoc dont les nœuds sont mobile connus sous le nom "réseaux mobiles

ad hoc" ou MANETs (Mobile ad hoc networks en anglais). Dans un réseau ad hoc, un nœud peut communiquer directement avec les nœuds qui sont dans son rayon de communication appelés voisins directs, pour communiquer avec d'autres nœuds en dehors de son rayon de communication un protocole de routage est nécessaire pour construire des routes entre les nœuds afin d'acheminer les données du nœud source vers le nœud destination. En d'autres termes, chaque composant du réseau agit en tant que terminal et nœud de relais, et participe au maintien de la connectivité dans le réseau tout entier [4].



FIGURE 1.1 – Réseau sans fil ad hoc.

1.2.2 Réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

1.2.2.1 Définition d'un nœud capteur

Un capteur est un petit dispositif électronique équipé d'une source d'énergie limitée. Les capteurs peuvent être placés ou semés dans une zone d'intérêt pour la surveiller, formant ainsi un réseau de capteurs (voir figure 1.2) [1].

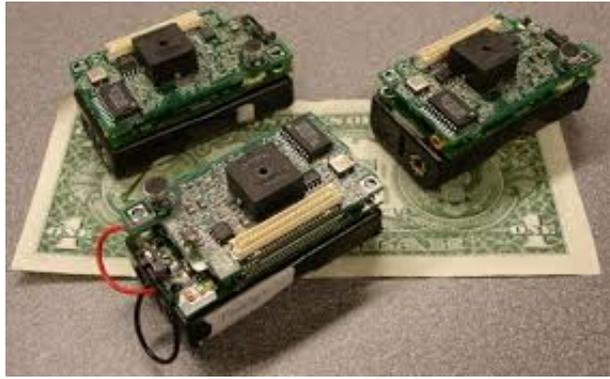


FIGURE 1.2 – Exemple d'un nœud capteur.

1.2.2.2 Architecture d'un capteur

Un nœud capteur est composé de quatre unités de base (voir figure 1.3) [5] :

- **Unité d'acquisition** : est généralement composé de deux sous-unités : les capteurs et les convertisseurs analogique-numérique (ADCs). Les capteurs obtiennent des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.
- **Unité de traitement** : est composée de deux interfaces : une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec le module de transmission. Elle contrôle les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds pour réaliser les tâches d'acquisition et stocke les données collectées.
- **Module de communication (Transceiver)** : il est responsable de toutes les communications via un support de communication radio qui relie le nœud au réseaux.
- **Batterie** : alimente les unités citées précédemment.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants optionnels tels que :

- **Systèmes de localisation** : il permet au nœud de récupérer sa position géographique, par exemple le GPS (Global Positioning System).
- **Mobilisateur** : il permet au nœud de changer de position après son déploiement.
- **Générateur d'énergie** : il permet au capteur de recharger sa batterie.

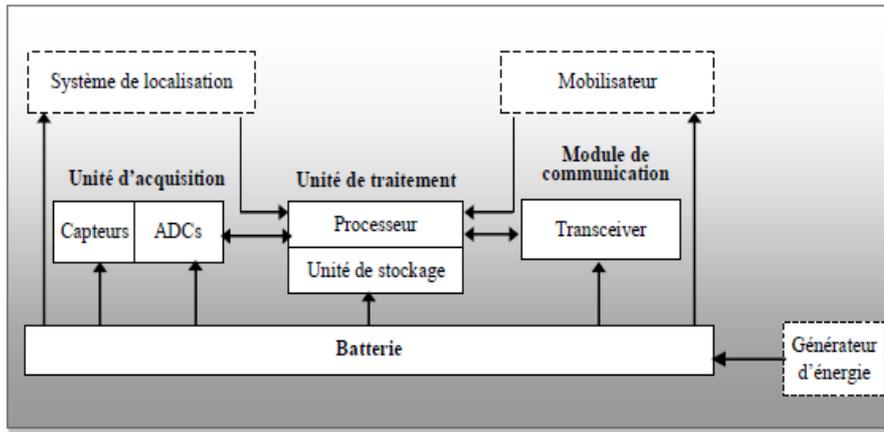


FIGURE 1.3 – Architecture d'un capteur sans fil

1.2.2.3 Zone de couverture / Zone de communication

Chaque nœud capteur possède un rayon de couverture (R_s) et un rayon de communication (R_c) (voir figure 1.4). Le premier représente le rayon d'une zone souvent considérée comme un disque, à l'intérieur de laquelle, lorsqu'un évènement attendu est produit, il sera détecté par le capteur ; cette zone est appelée zone de couverture. La couverture de la zone d'intérêt est composée de l'union de toutes les zones de couverture des nœuds du réseau. Le second représente la distance maximale qui peut séparer le nœud émetteur du nœud récepteur afin que ce dernier puisse recevoir les messages envoyés par l'émetteur ; la zone formée par le rayon de communication est appelée zone de communication. Un réseau est dit connecté lorsque tous les nœuds du réseau peuvent se communiquer d'une manière directe ou indirecte, par l'intermédiaire d'autres nœuds [6].

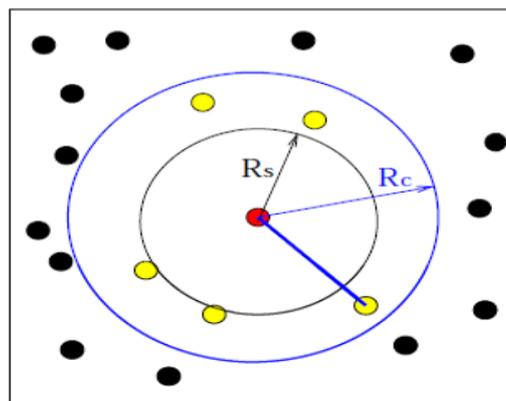


FIGURE 1.4 – Les rayons de couverture/communication d'un capteur.

1.2.2.4 Définition et architecture d'un RCSF

Un RCSF ou WSN pour Wireless Sensors Network en anglais (voir figure 1.5) se compose généralement d'un grand nombre de capteurs, qui communiquent entre eux via des liens radio pour le partage d'information et le traitement coopératif. Ces capteurs sont déployés le plus souvent d'une manière aléatoire dans une zone d'intérêt, pour superviser ou surveiller divers phénomènes. Les données collectées par ces capteurs sont envoyées soit directement, ou indirectement, par le biais d'une communication multi-sauts à un nœud considéré comme "point de collecte", appelé station de base. Cette dernière peut être connectée à une machine puissante via internet ou par satellite pour le traitement et l'analyse des données [7].

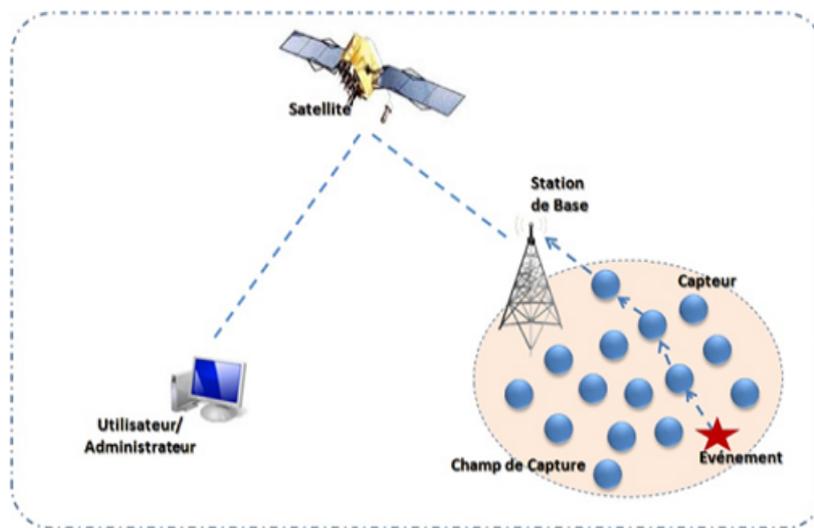


FIGURE 1.5 – Architecture d'un réseau de capteurs [15].

1.2.2.5 Caractéristiques des RCSFs

Un réseau de capteurs sans fil présente des caractéristiques particulières comparativement aux autres réseaux sans fil, les principales caractéristiques sont [8] :

- Les nœuds sont généralement déployés d'une manière dense.
- Les nœuds sont alimentés par des batteries et sont déployés dans un environnement hostile où il est très difficile de changer ou de recharger les batteries.
- Les nœuds ont des capacités d'énergie, de calcul et de stockage très limitées.
- Les nœuds sont généralement déployés de manière aléatoire et se configurent de manière autonome dans un réseau de communication.

- Les nœuds sont non-fiables, ils sont susceptibles de subir des dommages physiques ou des défaillances en raison de leur déploiement dans des environnements hostiles.
- Dans la plupart des applications de réseau de capteurs sans fil, les nœuds sont densément déployés dans une région d'intérêt et collaborent pour accomplir une tâche de détection commune. Ainsi, les données récoltées par plusieurs nœuds ont typiquement un certain niveau de corrélation ou de redondance.
- Un réseau de capteurs sans fil est généralement conçu et déployé pour une application spécifique. Les exigences de conception d'un réseau de capteurs sans fil changent avec son application.
- La topologie du réseau change fréquemment en raison des pannes, des dommages, de l'ajout des nœuds, de l'épuisement de l'énergie.

1.2.3 Comparaison entre les RCSFs et les réseaux Ad hoc

Les RCSFs sont souvent considérés comme étant les successeurs des réseaux Ad hoc. En effet, les RCSFs partagent avec les réseaux ad hoc plusieurs propriétés en commun telles que [9] :

- Absence d'infrastructure, de ce fait, les nœuds doivent être auto configurables.
- Communications sans fil, d'où la portée de communications des nœuds limitée par la capacité de rayonnement des antennes utilisées.

En plus des points communs caractérisant ces deux types de réseaux, il existe notamment des différences entre eux, telles que [9] :

- Une communication broadcast pour les réseaux de capteurs, contrairement aux réseaux ad hoc qui utilise souvent des communications unicast (point à point).
- Un nombre plus important de nœuds peut être utilisés dans un RCSF que pour les réseaux ad hoc (forte scalabilité).
- Le mode d'application de réseaux MANET est différent des RCSFs, i.e, les entités d'un réseau MANET sont souvent utilisées directement par des êtres humains comme les portables, tandis que les entités de RCSF interagissent essentiellement avec l'environnement.
- Dans le RCSF une collaboration entre plusieurs nœuds capteurs est nécessaire pour atteindre un même objectif. Cependant, dans les MANETs chaque nœud a son propre objectif.

Réseaux ad hoc	Réseaux de capteurs
Mobile, portable. . .	Petits capteurs
Génériques	Application dédiée
Chaque nœud a son propre objectif	Nœuds collaborent pour atteindre un objectif commun
Flot de données any-to-any	Flot de données Many-to-one, one-to-many, one-to-one
Communication point à point	Utilisation du broadcast
La qualité de service est majeure	Énergie est un facteur déterminant
Mobilité	Mobilité faible
Aucun nœud central	Station de base (coordination)

TABLE 1.1 – Comparaison entre les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs [16].

1.2.4 Architectures de communication dans les RCSFs

Les architectures de communication adoptées par les RCSFs se présentent en deux types, à savoir : L’architecture à plat et l’architecture hiérarchique. Ces dernières diffèrent selon le rôle attribué aux différents nœuds du réseau, et la manière dont les données capturées sont acheminées du point de captage vers la station de base [10].

1.2.4.1 Architecture à plat

Dans cette topologie, tous les nœuds appartenant au réseau ont le même rôle, ils coopèrent pour acheminer les données d’un nœud à un autre (saut par saut) jusqu’à atteindre la station de base (voir figure 1.6).

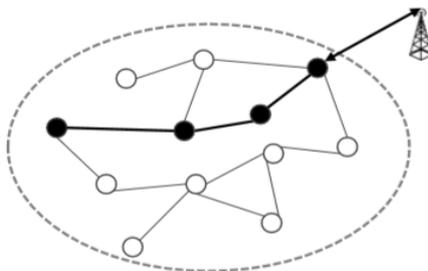


FIGURE 1.6 – Architecture à plat d’un RCSF.

1.2.4.2 Architecture hiérarchique

Dans l'architecture hiérarchique, deux classes de nœuds sont à distinguer : les nœuds ordinaires et les Cluster-Heads (CH). Le réseau est divisé en plusieurs clusters, chaque cluster est composé d'un ensemble de nœuds et un Cluster-Head. Les différents nœuds envoient les données collectées à leurs Cluster-Head, ce dernier les achemine jusqu'à la station de base par l'intermédiaire des autres Cluster-Heads (voir figure 1.7).

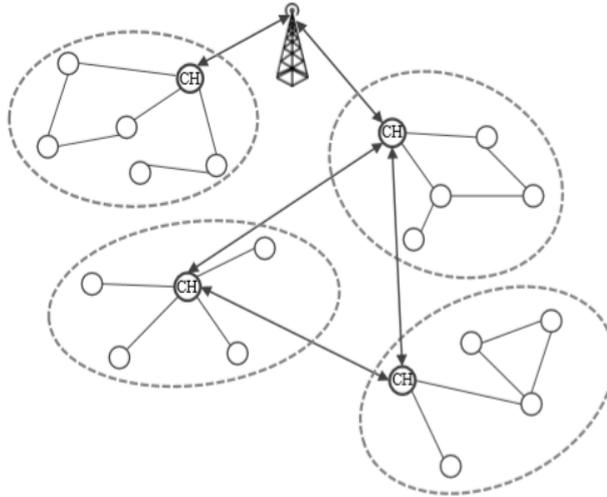


FIGURE 1.7 – Architecture hiérarchique d'un RCSF.

1.2.5 Pile protocolaire dans un RCSF

Contrairement aux réseaux traditionnels, les réseaux de capteurs utilisent une pile protocolaire de communication composée de cinq couches : une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données et une couche physique. La pile protocolaire utilisée par le nœud puits ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la figure 1.8.

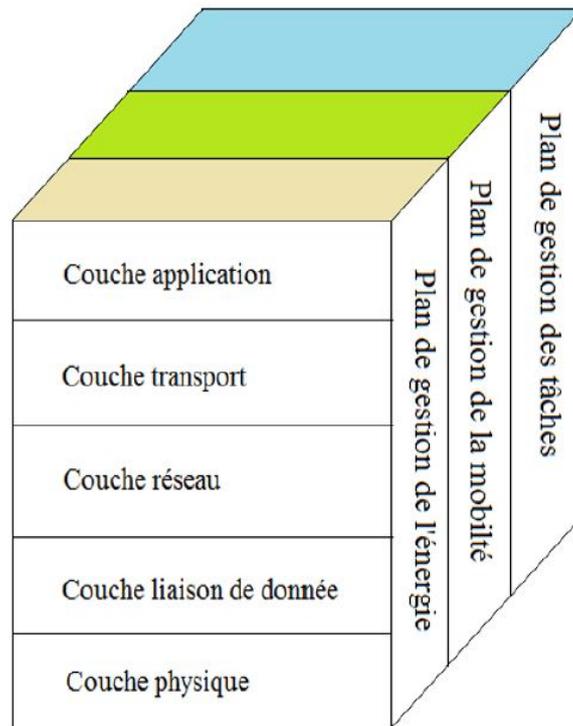


FIGURE 1.8 – Pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil [10].

Cette pile prend en charge le problème de consommation d'énergie, intègre le traitement des données transmises dans les protocoles de routage, et facilite le travail coopératif entre les capteurs. Les rôles des différentes couches sont résumés comme suit [10] :

1.2.5.1 Couche physique

La couche physique spécifie les caractéristiques matérielles, les techniques de modulation, la conversion des signaux numériques, analogiques et optiques.

1.2.5.2 Couche liaison de données

La couche liaison de données permet de contrôler la liaison logique. Elle permet aussi de spécifier comment les données sont expédiées entre deux paires de nœuds capteurs avec une distance d'un saut. Ainsi, le protocole MAC de cette couche liaison permet de gérer l'accès au support physique, en évitant les collisions causées souvent par l'accès concurrentiels. Cette couche est également responsable du multiplexage des données et du contrôle des erreurs de transmission. En outre, elle assure la liaison point à point et multipoint dans les RCSFs.

1.2.5.3 Couche réseau

Le rôle principal de la couche réseau est de router les données fournies par la couche transport de façon fiable jusqu'à la station de base, tout en essayant d'optimiser au mieux la consommation énergétique induite par l'ensemble des nœuds capteurs participant à ce routage.

1.2.5.4 Couche transport

La couche transport est chargée du transport fiable des données et du contrôle de flux. Pour bien mener ces fonctions, elle divise les données issues de la couche application du nœud source en segment avant leur envoi dans le réseau. Du côté du récepteur, ces données issues de la couche réseau sont réordonnées et réassemblées avant d'être envoyées à la couche application. Cette couche peut également gérer les files d'attente des paquets avant leurs transmissions à la couche réseau.

1.2.5.5 Couche application

La couche application est la couche la plus haute. Elle assure l'interfaçage avec les applications. Ainsi, suivant le type de nœud capteur, différents types d'applications peuvent être mises en œuvre. Cette couche gérée directement par les logiciels utilisateurs est le niveau le plus proche des utilisateurs. La couche application peut également gérer l'agrégation des données avant leur transfert à la couche transport.

Le rôle de chacun des différentes couches de gestion est décrit dans les paragraphes suivants [1] :

1.2.5.6 Couche de gestion d'énergie

Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs. Un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de capture.

1.2.5.7 Couche de gestion de mobilité

Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, de manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, et maintenir une image récente sur les nœuds voisins. Cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie.

1.2.5.8 Couche de gestion des tâches

Lors d'une opération de capture dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans laquelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau.

1.2.6 Domaines d'application des RCSFs

Les réseaux de capteurs sans fil ont approuvé leurs importance dans plusieurs domaines parmi les quels nous citons :

1.2.6.1 Applications militaires

Comme pour de nombreuses autres technologies, le domaine militaire a été le moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs.

Le déploiement rapide, l'auto organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Actuellement, les RCSFs peuvent être une partie intégrante dans le commandement, le contrôle, la communication, la surveillance...etc [5].

1.2.6.2 Applications médicales

Les réseaux de capteurs sont également largement répandus dans le domaine médical. Cette classe inclut des applications comme : fournir une interface d'aide pour les handicapés, collecter des informations physiologiques humaines de meilleure qualité, et surveiller en permanence les malades et les médecins à l'intérieur de l'hôpital...etc [5].

1.2.6.3 Applications environnementales

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés afin de surveiller des phénomènes environnementaux. Ainsi, ils sont déployés dans les forêts afin de détecter et de signaler un éventuel début d'incendie. Les capteurs peuvent aussi être semés avec les graines, afin de contrôler l'arrosage des plantes. Dans le domaine industriel, les capteurs sont généralement utilisés afin de détecter des fuites de produits toxiques, ou pour la surveillance des paramètres critiques tels que la température d'un réacteur nucléaire [5].

1.2.6.4 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs dans les processus de stockage et de livraison. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final. Grâce à ces réseaux, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service [11].

1.2.6.5 Applications à la sécurité

Les altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou à un vieillissement, peuvent être détectées par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton. Un RCSF de mouvements peut constituer un système d'alarme distribué qui sert à détecter les intrusions sur un large secteur [5].



FIGURE 1.9 – Domaines d'application des réseaux de capteurs.

1.2.7 Facteurs et contraintes des RCSFs

La conception et la réalisation des RCSFs sont influencées par plusieurs facteurs :

1.2.7.1 Passage à l'échelle (scalabilité)

Les RCSFs peuvent contenir des milliers de nœuds et cela dépend de l'application, par conséquent, les protocoles développés pour ces réseaux devraient gérer ce grand nombre efficacement [12].

1.2.7.2 Coût de production

Le coût de production d'un seul 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 financièrement justifiée. Par conséquent, réduire le coût de production jusqu'à moins de 1 dollar par nœud est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans fil [5].

1.2.7.3 Environnement

Les RCSFs doivent être conçus d'une manière à pouvoir résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement, telles que les fortes chaleurs, les pluies, l'humidité, les forts bruits, etc. Ces nœuds doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées [1].

1.2.7.4 Topologie du réseau

Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases [1] :

- **Déploiement** : les nœuds sont soit répartis de manière prédéfinie soit de manière aléatoire. Il faut alors que ceux-ci s'organisent de manière autonome.
- **Post-Déploiement - Exploitation** : durant la phase d'exploitation, la topologie du réseau peut être soumise à des changements dus à des modifications de la position des capteurs ou bien à des pannes.
- **Redéploiement** : l'ajout de nouveaux nœuds dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie.

1.2.7.5 Connectivité

Un réseau de capteurs est dit connecté si et seulement si, il existe au moins une route entre chaque paire de nœuds [13]. La connectivité dépend essentiellement de l'existence des routes. Elle est affectée par les changements de topologie dus à la mobilité, la défaillance des nœuds, les attaques, ... etc. Ce qui a pour conséquences : la perte de liens, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, la mise à jours des routes (le routage), ...etc.

1.2.7.6 Couverture

Dans les RCSFs, chaque nœud obtient une certaine vision de l'environnement. La vision d'un nœud donné sur l'environnement est limitée en termes de portée, c'est à dire, il ne peut couvrir qu'une zone physique limitée de l'environnement. Par conséquent, la couverture de la zone est un paramètre de conception important dans les RCSFs (voir les détails dans le chapitre 2)[8].

1.2.7.7 Durée de vie

C'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.

1.2.7.8 Qualité de service

Un protocole de routage doit veiller au respect des délais d'acheminement. Une donnée arrivant après un certain délai ne serait peut-être plus utilisable surtout dans des applications à temps réel [12].

1.2.7.9 Sécurité limitée

Les réseaux Ad hoc en général et les réseaux de capteurs en particulier, sont basés sur des communications sans fil, ce qu'il les rend plus sensibles aux attaques qui menacent les données transmises. Les techniques conventionnelles utilisées pour faire face à ces attaques ne sont pas applicables dans les réseaux de capteurs à cause des limitations de ressources. L'absence de sécurité dans les réseaux de capteurs augmente le risque des pannes de ce type de réseaux [14].

1.2.7.10 Consommation d'énergie

Les nœuds sont des composants micro-électroniques, ils ne peuvent être équipés que par une source d'énergie limitée. Dans la plupart des cas, ces nœuds ne peuvent être rechargés. Par conséquent, leur durée de vie dépend fortement de la durée de vie de leurs batteries. Pour cela, les nœuds doivent bien gérer leur consommation d'énergie [1].

Dans un réseau de capteurs sans fil multi-sauts, chaque nœud collecte des données et les transmet à la SB, et joue également le rôle d'un relais. Le dysfonctionnement de quelques nœuds entraîne un changement significatif de la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un réacheminement des paquets et une réorganisation du réseau. Toutes ces opérations consomment ainsi beaucoup d'énergie, c'est pour cette raison que les recherches se concentrent principalement sur les algorithmes et les protocoles à faible consommation d'énergie [8].

Dans les RCSFs, l'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance importante, qui influence directement sur la durée de vie du réseau dans sa globalité. Pour cela, les concepteurs peuvent, au moment du développement des protocoles, négliger les autres métriques de performances telles que la durée de transmission et le débit, au profit du facteur de consommation d'énergie.

1.3 Conclusion

Ce chapitre propose une vue globale des réseaux de capteurs sans fil et de leurs applications. Cependant, plusieurs contraintes conceptuelles compliquent la gestion de ce type de réseau. En effet, les réseaux de capteurs se caractérisent par une capacité énergétique limitée, ce qui rend l'optimisation de la consommation d'énergie dans ces réseaux une tâche critique afin de prolonger la durée de vie du réseau. Les réseaux de capteurs constituent un domaine de recherche très vaste vu leurs importances. Ces recherches portent principalement sur le développement de nouvelles solutions pour de nombreuses problématiques telles que : la connectivité, la couverture, la conservation d'énergie...etc.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder la couverture dans les RCSFs, ses types ainsi que ses critères de classifications. Ensuite, nous présenterons les algorithmes proposés dans la littérature pour résoudre les problèmes liés à la couverture.

État de l'art sur les approches de détection des trous de couverture

2.1 Introduction

Garantir la couverture de la zone d'intérêt est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs sans fil. Malheureusement, pour de nombreuses raisons tels que des événements naturels comme les feux ou des dommages physiques tels que l'écrasement par des animaux, des véhicules ou même l'épuisement de la batterie des capteurs conduisent à l'apparition de trous de couverture. La présence de ces trous de couverture dans un réseau de capteurs sans fil a de graves conséquences sur les performances du réseau, puisqu'elle affecte la couverture, la connectivité et les chemins de routage.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons expliquer la notion de couverture, ses différents types ainsi que l'ordonnancement des activités des capteurs, le reste du chapitre sera consacré à l'étude de quelques protocoles proposés dans la littérature en relation avec la détection et la correction des trous de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil.

2.2 La couverture dans les RCSFs

L'un des objectifs majeurs des réseaux de capteurs sans fil consiste à assurer une couverture totale et efficace d'une zone d'intérêt donnée. Le but est d'avoir chaque point physique de la zone d'intérêt à l'intérieur de la portée de capture d'au moins un capteur.

Une zone d'intérêt est dite couverte si et seulement si pour chaque point de cette dernière il existe au moins un capteur actif à une distance euclidienne inférieure à son rayon de capture. Le rayon de capture ou de couverture (R_s) représente la distance euclidienne maximale à laquelle un nœud est capable de percevoir un événement, de récolter des informations pertinentes

concernant son environnement [17].

2.2.1 Critères de classifications de la couverture

Les différents algorithmes proposés pour la couverture dans les réseaux de capteurs peuvent être classés selon les critères suivants [18] :

2.2.1.1 Méthodes de déploiement des capteurs

La méthode de déploiement des capteurs sur une zone d'intérêt diffère selon les propriétés de l'environnement. Pour cela, différentes méthodes de déploiement existent :

Le déploiement aléatoire, utilisé dans les environnements difficiles ou inaccessibles, gérant ainsi des positions inconnues et aléatoire des capteurs.

Le déploiement déterministe, utilisé dans les environnements accessibles et connus, ou les positions de capteurs peuvent être déterminé précisément.

2.2.1.2 Relation entre les rayons de capture et de communication

Cette relation détermine l'homogénéité ou l'hétérogénéité du réseau. Un réseau composé de capteurs ayant les mêmes rayons de capture et de communication est dit homogène. Dans le cas contraire, le réseau est dit hétérogène.

2.2.1.3 L'énergie

La taille des capteurs et leurs déploiement dans des zones hostiles et inaccessibles, fait que leur source d'énergie (la batterie) est difficilement rechargeable voir impossible.

2.2.1.4 La connectivité

La connectivité est la propriété d'avoir au moins un chemin entre chaque capteur du réseau et la station de base. Elle garantit l'acheminement des informations collectées en tout moment vers la station de base.

2.2.1.5 Caractéristiques des algorithmes utilisés

Les algorithmes de couverture sont soit distribués ou centralisés. Un algorithme distribué ne requiert aucune connaissance sur la topologie du réseau ni du voisinage, il se restreindra aux informations locales, et donc une exécution parallèle du protocole. Quant aux algorithmes centralisés, ils requièrent des informations globales sur le réseau.

2.2.2 Types de couverture

Il existe trois types de couverture [19][20].

2.2.2.1 Couverture de zone

Le problème de la couverture de la zone est le plus étudié dans les RCSFs, où l'objectif principal du réseau de capteurs est de couvrir une zone géographique (une région). La figure 2.1 montre un exemple d'un déploiement aléatoire des capteurs pour couvrir une zone en forme de carré.

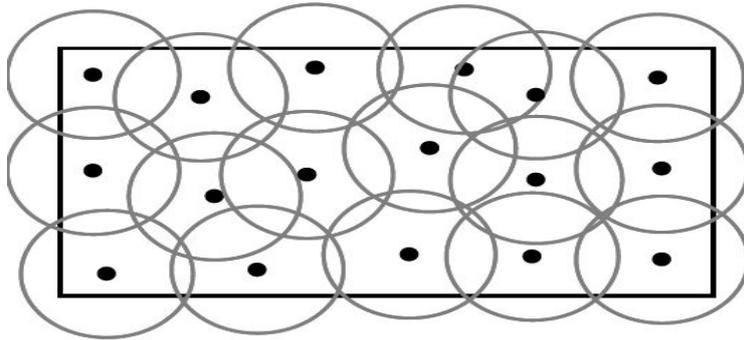


FIGURE 2.1 – Exemple de couverture d'une zone

2.2.2.2 Couverture de points

L'objectif principal dans ce type de couverture est de couvrir un ensemble de points spécifiques, dont la position géographique est connue. La figure 2.2 montre un exemple d'un ensemble de capteurs déployés pour couvrir un ensemble de points (étoiles) où les points noirs représentent les capteurs actifs.

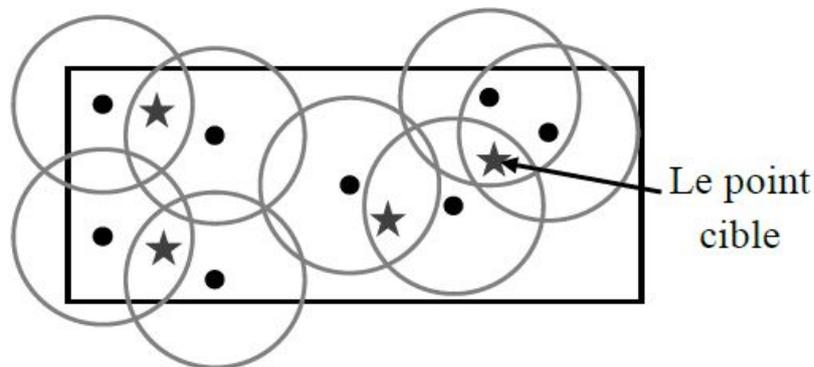


FIGURE 2.2 – Exemple de couverture de points

2.2.2.3 Couverture de barrière

La couverture de la barrière a pour objectif de minimiser la probabilité de pénétration inaperçue à travers la barrière (réseau de capteurs). La figure 2.3 représente un exemple de couverture de barrière.

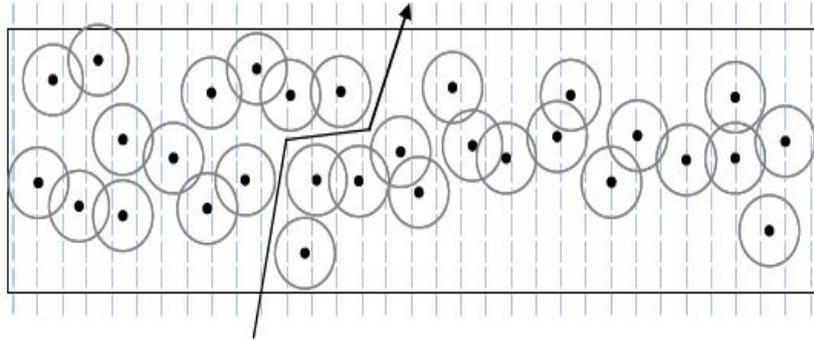


FIGURE 2.3 – Exemple d'une couverture de barrière

2.2.3 Ordonnancement d'activités dans les RCSFs

Les réseaux de capteurs sont généralement denses et redondants. En effet, à tout moment, il existe des capteurs qui observent une même portion de la zone de déploiement. Cette redondance est exploitée par l'ordonnancement d'activités qui consiste à mettre le minimum de capteurs en état actif, tout en garantissant une couverture totale de la zone d'intérêt, et les capteurs redondants en état passif, afin de préserver leur énergie.

2.2.4 Gestion de l'ordonnancement

L'ordonnancement d'activités peut se faire de diverses façons. Nous distinguons les approches centralisées, les approches hiérarchiques et les approches localisées [21].

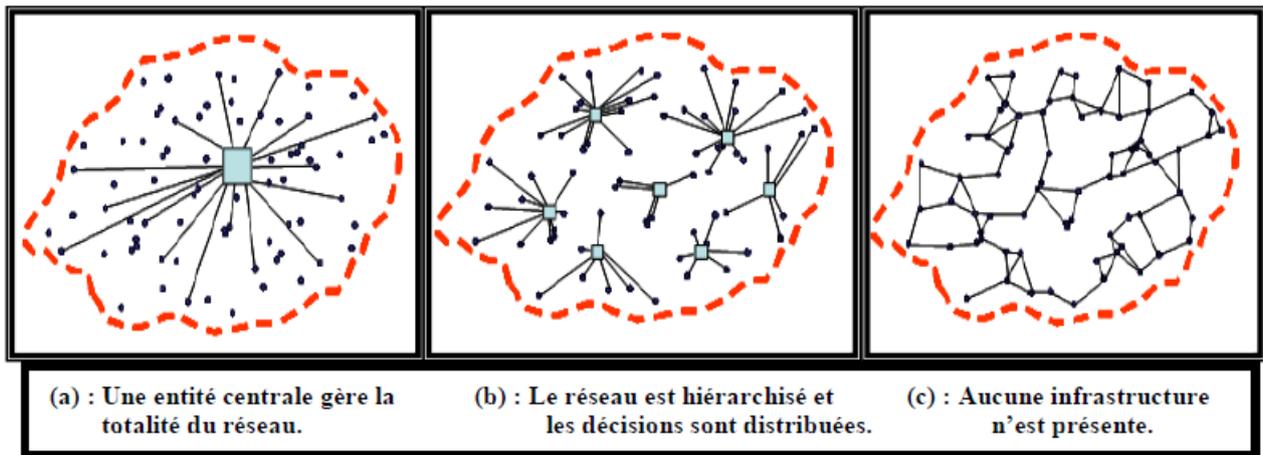


FIGURE 2.4 – Trois approches algorithmiques pour l'ordonnement d'activités.

2.2.4.1 Approche centralisée

Dans les solutions d'ordonnement centralisées, il faut pouvoir bénéficier d'une entité centrale ayant une vue sur tout le réseau. Cette entité, représentée par un carré sur la figure 2.4(a), peut assigner à chaque nœud un rôle. Les changements de topologie dus aux éventuelles pannes ou à la mobilité des nœuds sont scrutés de façon à pouvoir en informer les nœuds concernés. Ce genre d'utilisation se trouve dans les applications de domotique où les capteurs sont chargés de fournir des informations au contrôleur central lui-même chargé de réguler les différents appareils de la maison. Nous retrouvons également ces approches dans les applications de surveillance de structure, chargées de signaler toute anomalie dans l'édifice.

2.2.4.2 Approche hiérarchique

Dans une approche hiérarchique, le réseau est organisé en sous-ensembles, chacun doit s'autogérer. Pour cela, diverses solutions existent telles que l'élection de chefs de ces sous-ensembles (les carrés sur la figure 2.4(b)). Ce rôle peut être assigné à différents membres du sous-réseau de façon à répartir la charge de travail et à équilibrer les ressources disponibles. Dans un ordonnancement hiérarchique, les informations de changements de topologie ne sont propagées qu'au sein des sous-structures. Ceci en fait des solutions plus propices au passage à l'échelle. Contrairement à une approche centralisée où la complexité exponentielle serait accumulée dans une seule entité, elle serait ici répartie sur les différents sous-ensembles du réseau. Il reste néanmoins problématique de gérer les appartenances à ces sous-ensembles et le passage éventuel de

l'un à l'autre.

2.2.4.3 Approche localisée

Les approches localisées ne se reposent sur aucune infrastructure et n'ont pas la vocation à hiérarchiser le réseau (voir figure 2.4(c)). L'objectif est d'obtenir un comportement global cohérent à partir de comportements individuels. Dans une approche localisée, chaque nœud décide de sa propre activité en ne se basant que sur l'observation de ses propres voisins. Le comportement de chaque nœud n'est influencé que par ceux de ses voisins directs. Les changements de topologie du réseau (dus à la mobilité, aux pannes ou à des changements de statut) ne sont par conséquent vécus par les nœuds que comme de simples modifications de leurs voisinages. Ceci permet d'obtenir des solutions robustes, adaptables et surtout scalable, aspect extrêmement important dans des réseaux où les densités évoquées peuvent être d'une centaine de nœuds par zone de communication.

2.3 Étude de quelques protocoles de détection et de correction des trous de couverture

2.3.1 Définition d'un trou

Les trous de couverture (également appelés simplement trous) sont des régions qui ne sont surveillées par aucun des capteurs déployés [22].

Les trous de couverture peuvent être classés en deux catégories [23] :

- **Trous accessibles** : sont constitués de trous qui peuvent être corrigés en déployant de nouveaux capteurs (par exemple, les trous causés par l'épuisement de l'énergie).
- **Trous non accessibles** : sont constitués des trous qui ne peuvent pas être réparés (par exemple, les trous causés par la présence d'obstacles tels que des rivières, des bâtiments, etc.).

Pour la première catégorie, il devient essentiel que les trous soient nécessairement corrigés dès qu'ils apparaissent.

2.3.2 Classification des algorithmes de détection et de correction des trous de couverture

La détection des trous de couverture dans la région d'intérêt est effectuée par un capteur ou un groupe de capteurs. L'identification de ces régions du réseau facilitera l'amélioration de la qualité de service et le développement de protocoles de routage géographique. Les nœuds à la limite d'un trou de couverture ont une consommation d'énergie plus élevée en raison de l'augmentation de la charge de transmission. Par conséquent, la détection précise des nœuds de limite de trou est une tâche nécessaire pour le fonctionnement fiable du réseau et augmentera également la durée de vie du réseau de ces nœuds.

Une fois qu'un trou de couverture a été identifié, il est nécessaire de le réparer à l'aide de nœuds capteurs supplémentaires. La clé pour déterminer l'emplacement optimal pour le placement de nouveaux nœuds est d'avoir un chevauchement minimum entre les nouveaux nœuds placés dans la zone détectée et les nœuds existants dans le réseau [22].

De nombreuses recherches sur la détection des trous de couverture et leur correction ont été menées en trois grandes catégories : les méthodes géométriques, les méthodes statistiques et les méthodes topologiques.

La figure suivante propose une classification de quelques algorithmes de détection et de correction des trous selon les méthodes utilisées.

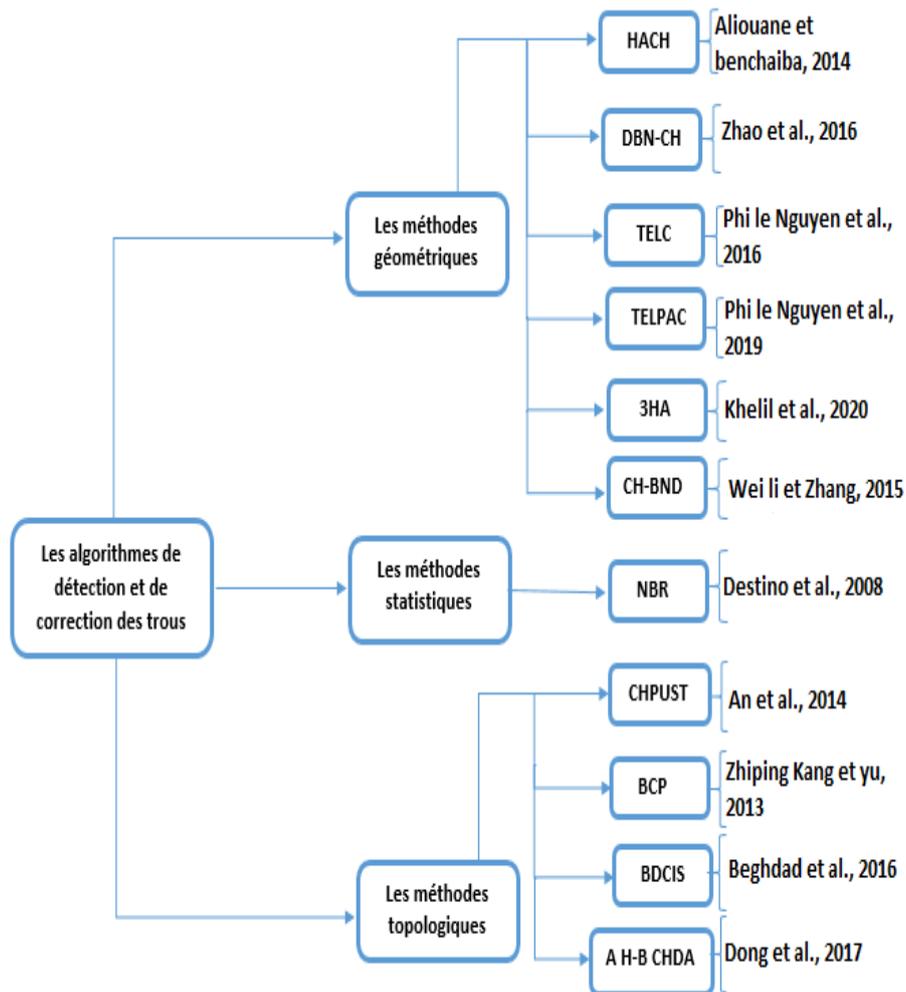


FIGURE 2.5 – Classification des algorithmes de détection / correction des trous de couverture.

2.3.2.1 Les méthodes géométriques

Les méthodes géométriques se basent sur les coordonnées de capteurs et des outils géométriques standards (tels que les diagrammes de Delaunay ou de Voronoï) pour détecter les trous de couverture et leurs limites [23].

i HACH (Healing Algorithm of Coverage Hole) [24]

Les auteurs dans [24] proposent un algorithme nommé HACH pour la correction des trous de couverture. Avant d'exécuter cet algorithme de correction, un algorithme de détection de trous proposé par les mêmes auteurs dans [25] est exécuté (qui peut être remplacé par un autre algorithme de détection se basant sur la même méthode), cette méthode consiste à détecter tous les nœuds limites en vérifiant leurs points d'intersection avec d'autres nœuds

ou avec les limites du champ d'intérêt. Si un point d'intersection n'est couvert par aucun autre nœud, il est considéré comme point limite et le nœud ayant au moins un point limite est considéré comme nœud limite. Dans l'algorithme HACH, le déploiement se fait aléatoirement, chaque nœud connaît ses coordonnées et les coordonnées de son voisin, les limites du réseau sont supposées connues. L'idée de l'algorithme est de trouver le centre cp d'un cercle passant par deux points limites consécutifs, avec un rayon de détection R_s . Si un cercle passe par ces deux points découverts, la zone autour d'eux sera couverte. Le cp central de ce nouveau cercle sera la meilleure position pour placer un nouveau nœud ou pour déplacer un nœud redondant. Pour minimiser la zone de chevauchement, chaque nœud de frontière utilise deux points pour trouver le point central cp . Le premier point est le nouveau point d'intersection np formé par le nouveau cercle au lieu de son point limite couvert et le second point est son point limite découvert. Cette procédure est exécutée à nouveau jusqu'à ce qu'aucun autre point limite ne soit trouvé. Ainsi, la zone non couverte sera entièrement couverte. L'algorithme proposé répare le réseau et minimise le nombre de nœuds nécessaires pour la correction des trous de couverture, en minimisant la zone de chevauchement des capteurs, néanmoins, il consomme beaucoup d'énergie puisque la ré-exécution de l'algorithme est nécessaire à chaque reprise.

ii **DBN-CH (Detecting Boundary Nodes and Coverage Holes)** [26]

Dans l'approche proposée dans [26], le déploiement se fait d'une manière aléatoire, chaque nœud a un identifiant unique et connaît son propre emplacement et celui de ses voisins à 1 et 2 sauts, tous les nœuds peuvent communiquer directement avec les nœuds adjacents appartenant à leur plage de communication, le rayon de détection R_s et le rayon de communication R_c sont égaux. La solution proposée se déroule en deux phases, la détection des nœuds limites et l'identification des trous de couverture. Dans la première phase, chaque nœud peut détecter de façon autonome s'il s'agit d'un nœud limite, à base de l'algorithme DSCS (Distributed Sector Cover Scanning). Dans la deuxième phase, les nœuds limites peuvent être regroupés en fonction des trous de couverture et de la limite extérieure du RCSF qu'ils renferment à base de l'algorithme DW (Directional Walk). DSCS fonctionne comme suit : la zone de détection de chaque nœud est divisée en plusieurs secteurs, si tous les secteurs de la zone de détection d'un nœud sont couverts par les voisins adjacents du nœud donc le nœud n'est pas un nœud limite sinon, le nœud est considéré comme un nœud limite. L'algorithme DW est basé sur l'algorithme DSCS, il

consiste à détecter les trous de couverture en reliant les nœuds limites qui entourent le même trou de couverture et en regroupant les nœuds sur la limite extérieure du RCSF. Les algorithmes proposés sont efficaces pour localiser les trous de couverture, améliorer l'efficacité du transfert de données et prolonger la durée de vie du RCSF.

iii **TELC (A Time and Energy Efficient Protocol for Locating Coverage Holes)** [27]

Un protocole de détection des trous de couverture appelé TELC a été proposé par Phi Le Nguyen et al. [27]. L'idée de ce protocole est d'approximer le trou par un polygone simple couvrant le trou en utilisant une grille triangulaire régulière donnée. Pour ce faire les auteurs ont supposé que la limite la plus extérieure du réseau de capteur est connue, tous les capteurs ont la même plage de détection R_s , et la même plage de communication R_c . Ils ont supposé également que chaque capteur connaît sa propre position et celle de ses voisins à 1 saut, la frontière de trou de couverture est une simple courbe fermée. Ce protocole vise à (1) identifier les limites des trous de couverture et (2) approcher ces trous par des polygones simples. Afin d'identifier les limites des trous de couverture, le processus se déroule en deux phases : la première consiste à vérifier s'il existe des trous de couverture, en recherchant des capteurs non couverts. Si des capteurs non couverts sont détectés, ils seront utilisés pour trouver les limites des trous. Pour ce faire, chaque capteur diffuse périodiquement des messages de notification des voisins qui contiennent ses informations, telles que : son ID et ses coordonnées puisque $R_c \geq 2R_s$, tous les capteurs peuvent obtenir des informations sur leurs voisins de détection, en utilisant ces messages de notification de voisin. Pour la seconde phase, Chaque capteur non couvert utilise un protocole de détermination des limites de trous pour localiser les limites des trous de couverture correspondants. Ce protocole est effectué en faisant voyager des paquets spéciaux autour des capteurs non couverts pour collecter des informations sur les limites des trous. Ce protocole exécute également un algorithme pour approximer les trous par des polygones plus simples en utilisant la grille triangulaire régulière. L'avantage de ce protocole est qu'il est efficace en termes de temps et de consommation d'énergie.

iv **TELPAC (A Time and Energy efficient Protocol for Locating and Patching Coverage holes)** [23]

Les auteurs dans [23] ont étudié le problème de détection et de correction des trous, ils proposent une solution nommée TELPAC. Elle consiste à localiser les limites des trous

et à déterminer les emplacements de correction. Dans cette approche, le déploiement se fait d'une manière aléatoire, la limite externe du réseau de capteurs est connue, un trou de couverture est une courbe fermée, chaque capteur connaît sa propre position et celle de ses voisins à un saut, tous les capteurs possèdent la même plage de détection R_s et la même plage de communication R_c tel que $R_c \geq 2 * R_s$. Afin d'identifier les limites des trous de couverture, TELPAC exécute un processus qui se déroule en deux étapes : la première est la détection des capteurs non couverts : Où, chaque capteur examinera si son cercle de détection contient un arc non couvert. La deuxième étape consiste à déterminer les limites des trous, des messages spéciaux circulent autour des capteurs non couverts pour collecter des informations sur les limites des trous à l'aide de polygones. Pour la correction des trous, TELPAC détermine les emplacements où déployer de nouveaux capteurs par la détermination d'un ensemble d'hexagones, l'idée principale est de minimiser le nombre d'hexagones de correction. Le protocole proposé est efficace en terme de temps et d'énergie mais les capteurs de correction peuvent situer en dehors des trous de couverture ou très proches des capteurs existants.

v **3HA (Hybrid Hole Healing Algorithm)** [28]

Khelil et al. dans [28] ont proposé un algorithme distribué nommé Hybrid Hole Healing Algorithm (3HA), pour trouver des positions efficaces pour la correction de trous de couverture. Pour ce faire, les auteurs ont supposé que le réseau contient des nœuds statiques et homogènes déployés de manière aléatoire dans une zone d'intérêt, chaque capteur possède une plage de communication avec un rayon de communication R_c et une plage de détection avec un rayon de détection R_s , Où $R_c \geq 2 * R_s$. Les trous sont détectés sur la base du processus de découverte de trous proposé dans [29], pour chaque trou, les auteurs ont défini un nœud HM(Hole Manager) ayant toutes les informations de localisations des nœuds limites pour chaque trou de couverture H_i , le nœud limite le plus proche du puits est sélectionné en tant que nœud gestionnaire du trou HM_i et exécute l'algorithme 3HA en tours, où chaque tour a deux phases : La première phase vise à trouver toutes les positions de correction possibles à l'aide d'un diagramme de Voronoi. Il prend tous les sommets de Voronoi dans le trou comme liste initiale des positions de correction. La deuxième phase vise à réduire au tant que possible l'ensemble des positions de correction, qui est obtenu lors de la phase précédente. Cette phase est basée sur une programmation linéaire entière et sur un modèle de capteur probabiliste. L'algorithme 3HA répète les

phases ci-dessus par tours, jusqu'à ce que tous les sommets de Voronoï soient couverts. Cette solution offre un taux de couverture élevé pour différentes formes et tailles de trous et réduit le nombre de capteurs supplémentaires.

vi **Coverage Hole and Boundary Nodes Détection** [30]

Les auteurs dans [30] ont proposé une approche géométrique localisée pour détecter les trous de couverture et pour découvrir les nœuds limites exacts entourant les trous dans les réseaux de capteurs sans fil. La détection des trous de couverture est obtenue en utilisant les propriétés des cercles vides et la triangulation de Delaunay. Dans cette approche le déploiement se fait d'une manière aléatoire, la plage de détection des nœuds est un disque régulier, chaque capteur connaît son propre emplacement. Cet algorithme comprend deux phases : la première phase c'est la détection des trous de couverture et la découverte des nœuds limites : le but de cette phase est de découvrir toutes les régions non couvertes et de regrouper les nœuds limites en différents groupes séparés pour chaque trou : cette phase commence par la construction des triangulations de Delaunay localisées du RCSF. Pour chaque triangle de Delaunay, calculer son cercle vide et estimer son centre et son rayon. Après avoir comparé le rayon R_c de chaque cercle vide avec le rayon de détection R_s , si $R_c > R_s$, il doit y avoir une région découverte dans le cercle vide. Ensuite, les centres des cercles vides de chaque paire de triangles de Delaunay voisins qui contiennent des trous de couverture seront connectés avec des segments de ligne pour avoir la limite du trou. La deuxième phase est le raffinement des nœuds de limite : dans cette phase, chaque groupe de nœuds de limite continue de calculer s'il contient ou non un faux nœud de limite. De cette façon, les nœuds limites pour chaque trou de couverture peuvent être obtenus avec précision.

2.3.2.2 Les méthodes statistiques

Les méthodes statistiques supposent que la distribution des nœuds au sein du réseau suit certaines propriétés statistiques, et ne nécessitent pas les informations de localisation des nœuds de capteur pour déterminer la limite du trou [3].

i **Network Boundary Recognition via graph-theory** [31]

Destino dans [31] a introduit un algorithme centralisé de reconnaissance des limites via la théorie des graphes (BRGT) basé sur une technique de clustering des graphes, qui permet la division du réseau en petites cellules (clusters) qui contournent les trous de connexion.

Ensuite, les nœuds limites de chaque cluster sont identifiés à l'aide des scores de centralité. La détection des nœuds limites est effectuée par la fusion de clusters adjacents. Seuls les nœuds situés à la frontière d'un cluster unique et qui ne sont pas connectés à deux clusters ou plus sont sélectionnés en tant que nœuds limites. L'inconvénient de cet algorithme est généré par la procédure de fusion qui sélectionne les nœuds à l'intérieur du réseau avec erreur comme nœuds frontières.

2.3.2.3 Les méthodes topologiques

Les méthodes topologiques ne nécessitent ni coordonnées ni localisation de capteurs. A la place, elles utilisent des propriétés topologiques telles que les informations de connectivité pour identifier les capteurs de limite [23].

i Coverage Hole Problem Under Sensing Topology [32]

Le travail proposé dans [32] a pour objectif la détection des trous de couverture. Pour ce faire, les auteurs ont étudié le problème de couverture de région en terme de relation entre la couverture de région et la topologie de détection. Dans cette approche le réseau de capteurs sans fil est représenté par un graphe fermé $G(V,E)$, où V et E sont respectivement les ensembles de nœuds et de liaisons. Si la distance entre les nœuds u et v est inférieure ou égale à R (plage de communication) alors, il existe un lien $(u, v) \in E$. Le graphe $G(V,E)$ représente à la fois la topologie de communication ainsi que la topologie de détection. Les auteurs ont supposé que tous les capteurs ont la même plage de détection R_s , $R_c \geq 2R_s$, chaque nœud capteur v_i peut faire 360° observations et a un disque de détection centré sur lui-même noté $S(v_i)$. La topologie de détection est constitué de tous les nœuds dans V et les S -lien dans E_s noté $G(V,E_s)$. La solution proposée se déroule en deux phases : La première est la partition de région, chaque réseau peut être divisé en un certain nombre de petites cellules dont chacune est définie par des liens de détection entre les capteurs noté $G(V,\bar{E}_s)$. La deuxième phase consiste à détecter des trous de couverture, en choisissant d'abord le lien frontière de $G(V,\bar{E}_s)$ et trouver la plus petite cellule correspondante. Ensuite, le lien sera supprimé et trouvé la cellule la plus petite suivante. Pour le graphe fermé $G_{n,n}$ (n nœuds et n liens) si $n > 3$ alors il existe ou moins un trou de couverture. Sinon, il suffit de déterminer le type de triangle formé par les nœuds pour déterminer l'existence de trous de couverture. Les résultats expérimentaux ont montré l'efficacité de ces algorithmes pour la détection des trous de couverture.

ii **BCP (Boundary Critical Points)** [33]

Les auteurs dans [33] ont proposé une solution distribuée pour la détection des trous de couverture et leur correction dans les réseaux de capteurs sans fil sans coordonnées, qui reposent sur la bissectrice perpendiculaire et les points critiques aux limites. Dans cette approche le déploiement se fait aléatoirement, les nœuds sont homogènes. Les auteurs ont supposé que les plages de détection et de communication d'un nœud S sont des disques avec des rayons R_s et R_c , où $R_c \geq 2R_s$, et qu'il n'y a pas deux capteurs au même endroit, chaque capteur a un identifiant unique. Cet algorithme noté boundary critical points (BCP) se déroule en trois phases : la première consiste à détecter tous les points critiques aux limites, pour ce faire une liste des points d'intersection (p_i) est créée : entre un nœud et ses voisins et entre un nœud et la limite de la région de surveillance, ensuite, vérifier si chaque point de la liste (p_i) est un point critique aux limites (b_i) ou non, et supprimer les points critiques non liés aux limites, cette procédure est effectuée pour chaque nœud du réseau. La deuxième phase est dédiée à la construction des lignes de délimitation, en reliant tous les points de limites consécutifs (b_i) jusqu'à ce que le point critique de délimitation de départ(b_i) soit revu ou que la limite de la région de surveillance soit touchée, les points de limites redondants seront supprimer. La dernière phase, se concentre sur la correction des trous trouvés, en déployant un nouveau capteur sur chaque position N trouver sur la bissectrice (b_i) et (b_j) telle que N_{b_i} et N_{b_j} soient approximativement égaux aux rayons de détection (R_s)(voir la figure 2.6). L'inconvénient de cette approche est que le cercle de détection du nœud ajouté passe toujours par deux points d'intersection, mais lorsque plusieurs points d'intersections sont proches (distance $\leq 2R_s$), certains points sont omis car ils se trouveront à l'intérieur du nouveau disque de détection.

iii **BDCIS(Boundary detection algorithm based on connected independent sets)** [3]

Afin de détecter les frontières et les trous de couverture dans les RCSFs, en utilisant uniquement les informations de connectivité des nœuds. Beghdad et al. dans [3] ont proposé un algorithme distribué nommé BDCIS(Boundary detection algorithm based on connected independent sets). Cet algorithme se base sur le concept de l'ensemble indépendant de la théorie des graphes pour sélectionner des nœuds limites des trous et les nœuds limites du réseau. Les auteurs supposent que le réseau soit connecté avec des liaisons symétriques,

les capteurs soient statiques et qu'il n'y a pas d'erreur de transmission. Tous les nœuds du réseau ont la même plage de communication et le graphe de communication suit le modèle de graphe à disque unitaire (UDG). Ainsi, un nœud (n_i) peut communiquer avec un autre nœud (n_j) si la distance entre eux est inférieure à la plage de communication R_c . Cet algorithme est divisée en trois étapes principales. Dans la première étape, chaque nœud collecte les informations de connectivité de ses voisins à un saut, en envoyant un message «Bonjour». Ainsi, chaque nœud (n_i) reçoit un message de chacun de ses voisins et peut créer une liste de ses voisins à un saut. Cette liste est transmise à ses voisins directs. Dès réception de cette liste, chaque nœud peut construire le graphe de ses voisins à un saut. Dans la deuxième étape, des ensembles indépendants de cardinalité α sont établis. Un graphe peut avoir au plus un ensemble indépendant maximal. Le premier est déterminé comme suit : en commençant du nœud ayant l'id minimum ou maximum dans le graphe G_i , qui représentera le premier élément de l'ensemble indépendant. Ensuite, tous les voisins de ce nœud seront supprimés de G_i . Un autre nœud ayant l'id minimum parmi les nœuds restants de G_i sera choisi. Cette procédure est répétée pour construire tous les autres ensembles indépendants possibles. Dans la dernière étape, consiste à connecter ces ensembles et rechercher des chemins fermés.

iv A Homology-Based Coverage Hole Detection Algorithm [34]

Un algorithme distribué avec uniquement des informations de connectivité est proposé dans [34] pour la détection de trous de couverture non triangulaires. Dans cette approche le déploiement se fait d'une manière aléatoire dans un champ planaire, chaque capteur possède un rayon de détection R_s et un rayon de communication R_c , les nœuds situés à l'intérieur de la zone cible sont appelés des nœuds internes et ceux qui sont situés à la limite externe de la zone cible sont appelés capteurs clôture. Un capteur déployé ne connaît pas son emplacement, mais peut connaître l'angle qu'il diverge de tous ses voisins. Cet algorithme se déroule en quatre phases : La première consiste à obtenir des informations sur les voisins à 1 et 2 sauts, en diffusant des messages «*Hello*» et à construire un graphe de voisinage. Dans la deuxième phase, chaque arrête peut être déterminé s'il s'agit d'une arrête limite. Pour chaque arrête $[v_1 v_2]$, les voisins communs de v_1 et v_2 désignent l'ensemble $\{v_i, v_{i+1}, \dots, v_m\}$. En utilisant θ_{12} pour désigner l'angle que le nœud v_2 diverge du nœud v_1 et $\{\theta_{1i}, \dots, \theta_{1m}\}$ pour désigner les angles que les nœuds communs divergent du nœud v_1 . Si θ_{12} n'appartient pas à la plage de deux angles parmi $\{\theta_{1i}, \dots, \theta_{1m}\}$ et $[v_1$

$v_2]$ n'est pas une arrête pseudo frontière (pour une arrête $[v_1 v_2]$ le nœud v_3 est l'un des voisins de v_1 mais pas celui de v_2 et le nœud v_4 est l'un des voisins de v_2 mais pas celui de v_1 , v_3 et v_4 sont des nœuds voisins. Si v_3 et v_4 ont au moins un nœud voisin commun qu'est également un nœud voisin commun de v_1 et v_2 donc $[v_1 v_2]$ est un bord pseudo frontière.) alors, $[v_1 v_2]$ est un bord limite. Dans la troisième phase, lorsqu'un bord sait qu'il s'agit d'un bord limite, les deux nœuds qui le construisent peuvent diffuser cette information à leurs voisins, tous les nœuds peuvent alors connaître le statut de leurs voisins. Après cela, certains nœuds peuvent lancer le processus de découverte de trous pour trouver des cycles délimitant des trous. Les cycles retrouvés lors de la troisième phase ne sont pas tous des cycles minimaux, et certains d'entre eux représentent le même trou. Il est donc nécessaire de choisir le cycle minimum pour chaque trou parmi tous les cycles découverts. Pour deux cycles limites, s'ils partagent plus de quatre nœuds à l'exception du nœud initiant le cycle, un seul cycle est gardé.

2.4 Comparaison des protocoles de détection et de correction des trous de couverture

Les protocoles étudiés dans ce chapitre qui traitent le problème de trous de couverture, peuvent être classifiés selon plusieurs critères. Parmi ces critères, nous citons :

2.4.1 Connaissance des positions

Chaque capteur connaît ses coordonnées géographiques obtenues par l'utilisation d'un dispositif de localisation (par exemple GPS). Néanmoins, ce dispositif rend les capteurs plus coûteux et entraîne une consommation considérable d'énergie qui est la contrainte la plus critique dans un réseau de capteurs.

2.4.2 Découverte des voisins

Cette phase engendre un nombre élevé de messages échangés entre les capteurs pour les réseaux dense, ce qui augmente la consommation d'énergie. Toutefois, cette phase est nécessaire pour le bon fonctionnement de certains protocoles.

2.4.3 Détection des trous

La détection des trous peut concerner la détection des limites des trous ou les limites du réseau et le trous à la fois.

2.4.4 Correction des trous

Parmi les protocoles étudiés, certains d'entre eux proposent également des solutions pour la correction des trous.

2.4.5 Homogénéité

La plupart des protocoles traitent le cas des capteurs homogènes, ce qui n'est pas toujours le cas dans les applications réelles.

2.4.6 Type de protocole

Il existe trois types de protocole : les protocoles centralisés, hiérarchiques et distribués. Dans les approches distribuées, chaque capteur collecte des informations de ses nœuds adjacents. Puis, il détermine son statut de manière autonome. Alors que dans les approches centralisées, une entité centrale appelée station de base recueille les informations des nœuds et décide de l'état de chacun d'entre eux. Tandis que dans un protocole hiérarchique, les informations de changements de topologie ne sont propagées qu'au sein des sous-structures.

Protocoles/Critères	Connaissance des positions	Découverte des voisins	Détection des trous	Correction des trous	Homogénéité	Type de protocole
HACH (Aliouane et al.[24])	Oui	Non	Non	Oui	Homogène	Distribué
DBN-CH (Zhao et al.[26])	Oui	Oui	Oui	Non	Homogène	Distribué
TELC (Phi et al.[27])	Oui	Oui	Oui	Non	Homogène	Distribué
TELPAC (Phi et al.[23])	Oui	Oui	Oui	Oui	Homogène	Distribué
3HA (Khelil et al.[28])	Oui	Non	Non	Oui	Homogène	Distribué
CH-BND (Wei et al.[30])	Oui	Non	Oui	Non	Homogène	Distribué
NBR (Destino et al.[31])	Non	Non	Oui	Non	Homogène	Centralisé
CHPUST (An et al.[32])	Non	Non	Oui	Non	Homogène	Distribué
BCP (Zhiping et al.[33])	Non	Non	Oui	Oui	Homogène	Distribué
BDCIS (Beghdad et al.[3])	Non	Oui	Oui	Non	Homogène	Distribué
AH-B CHDA (Dong et al.[34])	Non	Oui	Oui	Non	Homogène	Distribué

TABLE 2.1 – Tableau Comparatif des protocoles étudiés.

2.5 Discussion

A l'issue de l'étude réalisée sur la détection des trous de couverture dans les RCSFs, beaucoup de travaux ont été recensés. Bien que ces derniers diffèrent selon la démarche adoptée mais ils aboutissent au même objectif. Plusieurs paramètres doivent être pris en considération lors du développement de nouvelles approches de détection de trous de couverture pour pallier aux limitations des travaux cités précédemment. Nous avons constaté que toutes les approches présentées supposent que tous les capteurs du réseau soient homogènes, ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité. Nous avons remarqué pareillement que la consommation d'énergie et l'étude des messages échangés dans le réseau ne sont pas pris en compte dans tous les travaux, notamment [23, 26, 27]. La taille exacte du trou n'est également pas estimée par toutes les approches. Le challenge est donc de proposer une approche de détection des trous de couverture dans les RCSFs qui permet, d'une part de prendre en compte l'hétérogénéité des capteurs, et

d'autre part, de calculer avec précision la taille des trous tout en réduisant la consommation d'énergie.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la notion de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, ses critères de classifications, ses types et la gestion d'ordonnancement dans les RCSFs. Ensuite, nous avons établi un état de l'art sur les travaux de recherche concernant la détection et la correction des trous de couverture. Enfin, nous les avons comparés selon les différents critères retenus. Le chapitre suivant sera consacré à la description détaillée de notre solution.

Proposition d'une approche de détection des trous de couverture dans les RCSFs

3.1 Introduction

Après avoir étudié le problème de couverture dans les RCSFs et en particulier, celui de la détection des trous. Nous présenterons dans ce chapitre un algorithme de détection des trous de couverture. Cet algorithme se base sur un balayage logique de toute la surface de la zone d'intérêt avec une droite parallèle à l'axe des ordonnées. Nous commençons par la présentation d'un certain nombre d'hypothèses ainsi que quelques définitions liées à la solution proposée. Ensuite, nous détaillerons les différentes phases de notre approche de détection des trous de couverture.

3.2 Motivation

L'un des objectifs majeurs dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) est de garantir une couverture complète et efficace d'une zone d'intérêt donnée. Plusieurs facteurs peuvent se produire dans les réseaux de capteurs sans fil et former des trous de couverture. Ces trous peuvent perturber la couverture ou la connectivité existante et nuire aux fonctionnalités du réseaux. Afin d'assurer la pleine opérabilité d'un RCSF, il est nécessaire de détecter et de corriger les trous de couverture dès leurs apparition. Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature afin de remédier ce problème. Chacune a ses avantages et ses inconvénients. A cet effet, nous proposons une nouvelle approche centralisée dans le but de détecter les trous de couverture dans un RCSF. C'est dans ce contexte, que notre algorithme a été proposé.

3.3 Propriétés du réseau et hypothèses

Dans ce mémoire, nous considérons un réseau de capteurs sans fil de superficie $L * L$ composé de $NofNode$ capteurs statiques (les différentes notations et abréviations sont définies dans le tableau 3.1), déployés aléatoirement afin de collecter continuellement les évènements pouvant se produire dans la zone de déploiement. La solution proposée tient compte des hypothèses suivantes :

- Il est supposé l'existence d'au moins une station de base capable de communiquer avec tous les nœuds du réseau et possède une énergie illimitée.
- Tous les nœuds du réseau sont localisés en terme de coordonnées (x,y) .
- Les nœuds du réseau sont hétérogènes, c.a.d ils peuvent avoir des rayons de détection R_s et/ou de communication R_c différents.
- Chaque nœud transmet à la station de base son R_s et son R_c ainsi que ses coordonnées.
- Un protocole de routage est supposé présent pour acheminer les information entre les nœuds et la station de base.

3.4 Notre protocole de détection des trous

Notre solution pour la détection des trous de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil se déroule en trois phases distinctes : La phase de balayage qui consiste à identifier les segments non-couverts, la phase de détection des trous et enfin la phase de fusion des trous adjacents. Avant de présenter les détails de chaque phase. Nous listons quelques définitions nécessaires pour la compréhension de notre approche.

3.4.1 Quelques définitions

Afin de bien cerner le problème et afin d'assurer une convergence dans les significations, quelques définitions ont été établies.

Définition 1

Un segment : un segment seg est une partie de la droite de balayage, il est défini par le triplet (x, y_1, y_2) où

$$\begin{cases} x \text{ est sa coordonnée sur l'axe des X (abscisses)} \\ y_1, y_2 \text{ sont ses coordonnées sur l'axe des Y (ordonnées) tel-que } y_1 < y_2 \end{cases}$$

Définition 2

Un segment couvert : un segment $seg(x, y_1, y_2)$ est dit couvert si tous les points appartenant à ce segment sont dans la zone de couverture d'au moins un capteur.

Définition 3

Un segment non-couvert : un segment $seg(x, y_1, y_2)$ est dit non couvert si tous les points appartenant à ce segment ne figurent dans la zone de détection d'aucun capteur.

Définition 4

Les points limites : on appelle les point limites d'un segment non couvert $seg(x, y_1, y_2)$ les deux points d'extrémités (x, y_1) et (x, y_2) . L'ensemble de tous les points limites de tous les segments non couverts représentent les points qui déterminent les limites des trous.

Définition 5

Les segments adjacents : Deux segments $Seg_i(x_i, y_{i1}, y_{i2}), Seg_j(x_j, y_{j1}, y_{j2})$ sont dits adjacents lorsque toutes les conditions suivantes sont satisfaites :

- $|x_i - x_j| = \Delta$. (Δ est le pas de balayage)
- $y_{i2} > y_{j1}$.
- $y_{i1} < y_{j2}$.

Définition 6

Les trous adjacents : Deux trous $Hole_i, Hole_j$ sont dits adjacents, si le dernier segment non-couvert de $Hole_i$ a au moins un segment adjacent parmi les segments non-couverts qui constituent le trou $Hole_j$.

Le Tableau 3.1 suivant décrit les différentes notations utilisées dans les pseudo-algorithmes de l'approche de détection des trous proposée.

Notation	Signification
$NofNode$	Nombre de nœuds déployés.
Δ	Le pas de la droite de balayage.
$L * L$	La taille de la zone d'intérêt.
$Intersec(D) = \{P_{11}, \dots, P_{1n}; P_{21}, \dots, P_{2n}\}$	L'ensemble des points d'intersections entre une droite de balayage D avec $D = 0, \Delta, 2*\Delta, \dots$ et les nœuds de 1 à n / Tel-que $P_{1i} < P_{2i}$.

<i>NCov-Seg</i>	L'ensemble des segments non-couverts.
<i>CurrentSegment</i>	Le segment en cours.
<i>Adj-Seg</i>	L'ensemble des segments adjacents non couverts triés dans l'ordre croissant de leurs y_1 .
<i>Start-Segment</i>	Le segment non-couvert le plus à gauche et le plus en bas.
<i>Hole</i>	L'ensemble de <i>Adj-Seg</i> qui forment le trou.
<i>Network-Holes</i>	L'ensemble de tous les trous de couverture détectés.
<i>Last-Segment</i>	Le dernier segment qui constitue le trou.

TABLE 3.1 – Différentes notations utilisées dans l'approche proposée.

3.4.2 Fonctionnement générale de notre proposition

Notre approche se déroule en trois phases, la première consiste à faire un balayage du réseau pour déterminer l'ensemble des segments non-couverts, la deuxième est dédiée à la construction des trous dans laquelle nous allons chercher le premier segment non-couvert du trou le plus à gauche et le plus en bas si ce segment est trouvé nous allons lui chercher le prochain segment adjacent non-couvert dans le même sens du balayage, puis, si ce segment est trouvé il sera ajouté au trou sinon le trou est fermé, cette procédure est répéter jusqu'à aucun segment non-couvert est trouvé, enfin la dernière phase qui consiste à fusionner les trous adjacents.

L'organigramme montré dans la Figure 3.1 explique le processus d'exécution de notre approche de détection des trous.

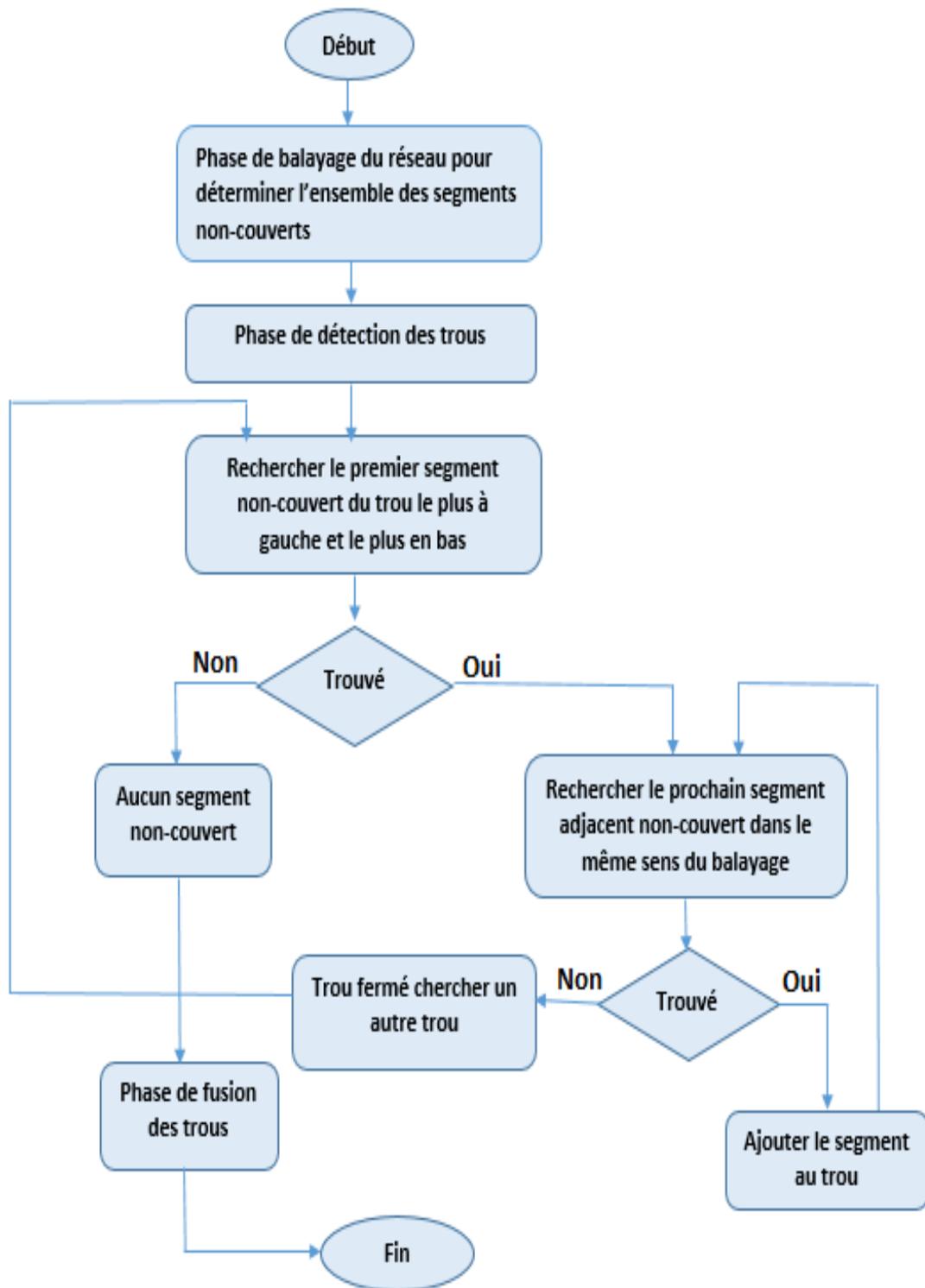


FIGURE 3.1 – Organigramme général de notre approche de détection des trous.

3.4.3 La phase de balayage du réseau pour l'identification des segments non-couverts

Dans cette phase, la station de base effectue un balayage logique du réseau, avec une droite verticale parallèle à l'axe des ordonnées (Voir la figure 3.2), depuis la position $X = 0$ jusqu'à $X = L$. Nous varions la position de la droite de balayage successivement avec un pas égale Δ (ie : $X=0$, puis $X=\Delta$, $X=2\Delta$, $X=3\Delta$,..., $X=L$). A chaque pas de balayage, la station de base identifier tous les points d'intersections entre la droite de balayage et les différents nœuds du réseau. Ensuite, nous allons trier les segments de droite couverts selon l'ordre croissant des Y et nous déterminons les segments non-couverts. Le pseudo-code de cette phase est décrit dans l'algorithme 1.

La figure suivante représente les différentes étapes de cette phase.

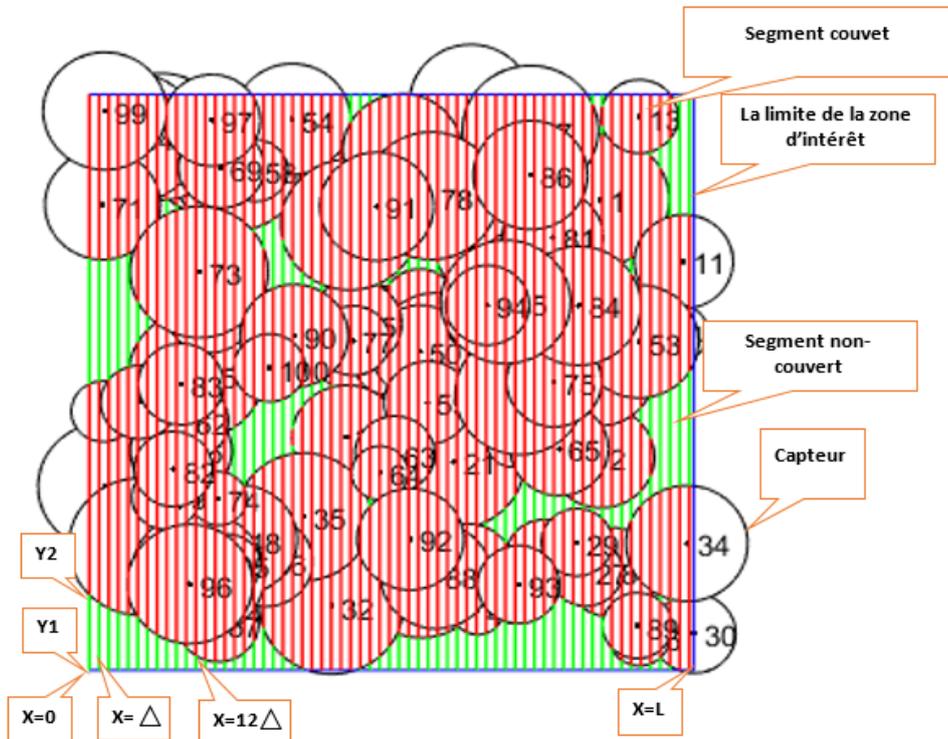


FIGURE 3.2 – Illustration de la phase de balayage.

Algorithm 1 Identification des segments non-couverts

Entrées : $\Delta, L, Intersec(D)$.

Sorties : $NCov-Seg$.

Début

```

1: Pour  $j \leftarrow 0$  à  $L$  (avec un pas =  $\Delta$ ) faire
2:   Si ( $Intersec(D) \neq \emptyset$ ) alors
3:     Pour  $i \leftarrow 1$  à  $|Intersec(D)|$  faire
4:       Si ( $P_2(i) < P_1(i+1)$ ) alors
5:          $NCov-Seg \leftarrow NCov-Seg \cup (x, y_{2i}, y_{1_{i+1}})$ 
6:       FinSi
7:     FinPour
8:   FinSi
9: FinPour

```

Fin

3.4.4 La phase de détection des trous

Après avoir déterminé tous les segments non-couverts dans la phase précédente, nous allons commencer la construction du trou. La première étape consiste à rechercher Start-Segment (voir la première ligne de l'algorithme 4), le premier segment qui constitue le trou. Il représente le segment non-couvert le plus à gauche et le plus en bas et n'ayant pas été choisi dans la construction d'aucun trou (voir l'entrée de l'algorithme 3). Ensuite, nous allons chercher l'ensemble des segments adjacents à ce segment, et qui n'ont pas été déjà sélectionnés (voir l'algorithme 2). Les segments adjacents trouvés seront ajoutés au trou en cours de construction (voir la première ligne de l'algorithme 3). Pour chaque segment adjacent trouvé, nous allons construire l'ensemble de ses segments adjacents. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que aucun segment adjacent ne soit trouvé (voir l'algorithme 3). Après avoir déterminé tous les segments du trou, nous allons relier les extrémités de tous les segments non-couverts sélectionnés pour avoir les limites exactes du trou (voir l'algorithme 4).

Algorithm 2 Construction de l'ensemble des segments adjacents non couverts

Entrées : $NCov-Seg$, $CurrentSegment$.

Sorties : $Adj-Seg$.

Début

- 1: **Pour** tout $seg_i \in NCov-Seg$ **faire**
- 2: **Si** Seg_i est adjacent avec $CurrentSegment$ **alors**
- 3: $Adj-Seg \leftarrow Adj-Seg \cup \{Seg_i\}$
- 4: **FinSi**
- 5: **FinPour**
- 6: Trier $Adj-Seg$ dans l'ordre croissant des P1

Fin

Algorithm 3 Construction du trou

Entrées : $CurrentSegment$.

Sorties : $Hole$.

Début

- 1: $Hole \leftarrow Hole \cup \{CurrentSegment\}$
- 2: Appeler Algorithme 2 avec $CurrentSegment$
- 3: **Si** ($Adj-Seg \neq \emptyset$) **alors**
- 4: **Pour** tout $seg_i \in Adj-Seg$ **faire**
- 5: Appeler Algorithme 3 avec seg_i
- 6: **FinPour**
- 7: **FinSi**

Fin

Algorithm 4 Construction de tous les trous du réseau

Entrées : $NCov-Seg$.

Sorties : $Network-Holes$.

Début

- 1: Rechercher *Start-Segment* parmi les segments de $NCov-Seg$ non encore sélectionnés
- 2: **Si** *Start-Segment* est trouvé **alors**
- 3: Appeler l'algorithme 3
- 4: $Network-Holes \leftarrow Network-Holes \cup \{Hole\}$
- 5: Aller à 1
- 6: **FinSi**

Fin

3.4.5 La phase de fusion des trous

A la fin de la phase précédente, ie, une fois tous les trous du réseau ont été détectés, des trous adjacents peuvent apparaitre, pour y remédier nous allons chercher s'il a un trou adjacent pour chaque trou détecté. Pour ce faire, nous allons sélectionner le dernier segment non-couvert d'un trou $Hole_i$, puis, nous lui rechercherons un segment adjacent parmi les différents segments des différents trous. Si un segment adjacent appartenant à un trou $Hole_j$ est trouvé, les deux trous $Hole_i$ et $Hole_j$ seront fusionnés en un seul trou (voir la figure 3.3). Une mise à jour de l'ensemble des trous du réseau $NetworkHoles$ sera réalisée. Le pseudo-code de cette phase est décrit dans l'algorithme 5.

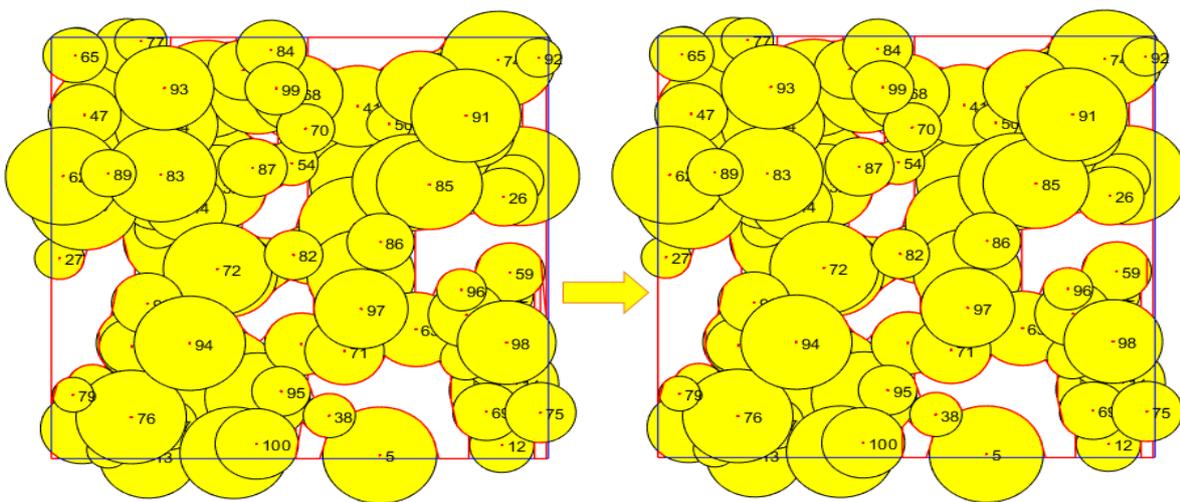


FIGURE 3.3 – Exemple illustratif avant/après la fusion des trous

Algorithm 5 Fusion des trous

Entrées : *Network-Holes*.

Sorties : *Network-Holes*.

Début

```

1: Pour tout  $Hole_i \in Network-Holes$  faire
2: Rechercher Last-Segment de  $Hole_i$ 
3:   Pour tout  $Hole_k \in Network-Holes$  faire
4:     Si ( $i \neq k$ ) alors
5:       Pour tout  $Seg_j \in Hole_k$  faire
6:         Si  $Seg_j$  est adjacent avec Last-Segment alors
7:           Fusionner  $Hole_i$  et  $Hole_k$ 
8:         FinSi
9:       FinPour
10:    FinSi
11:  FinPour
12: FinPour

```

Fin

3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, une approche centralisée pour la détection des trous de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil. Cette approche se base sur la recherche des segments non-couverts et leurs segments adjacents. Le but de cette approche est d'identifier tous les trous qui se trouvent dans le réseau et par conséquent l'amélioration de la qualité de service ainsi que les performances du réseau. Le chapitre suivant sera consacré à l'évaluation de performances de notre approche de détection des trous de couverture.

Simulation et évaluation des performances

4.1 Introduction

Le présent chapitre est dédié à la validation par simulation de notre approche de détection des trous de couverture. Nous présenterons en premier lieu l'environnement et les paramètres de simulation considérés pour l'évaluation des performances de notre solution. Nous décrirons par la suite, les critères et les métriques de simulation utilisés. Les résultats obtenus à l'issue de ces simulations seront finalement interprétés et comparés avec le protocole proposé dans [33] et présenté dans le chapitre de l'état de l'art.

4.2 Environnement de la simulation

L'algorithme de détection de trou de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil proposé a été mis en œuvre et évalué à l'aide de Matlab R2019a fonctionnant sur un PC équipé d'un système Windows 64 bits et d'un Intel Core i3-4005H avec une fréquence de 1.7 GHz et 4 Go de RAM. Nous avons choisi comme environnement de simulation MATLAB pour de nombreuses raisons parmi les quelles nous citons les suivantes [35] :

- MATLAB (MATrixLABoratory) est un langage de programmation de calcul scientifique et de visualisation graphique développé par la société The MathWorks. Il est disponible sur plusieurs plateformes.
- MATLAB dispose d'une large bibliothèque de fonctions pré-définies avec des notations simples et puissantes donc optimiser le code des programmes.
- MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, etc.

4.3 Paramètres de simulation

Pour évaluer les performances de notre approche, nous avons procédé à la comparaison avec le protocole BCP proposé dans [31].

Paramètre	valeur
Le nombre de capteurs	250, 300, 350, 400, 450, 500
Le pas de balayage (Δ)	1 m
Dimension de la région ($L*L$)	500 x 500(m ²)
Coordonnées de la station de base	(0,0)
Rayon de détection (R_s)	40 m
Rayon de communication (R_c)	80 m

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

4.3.1 Critères de simulation

Les critères considérés pour l'évaluation de performances sont les suivantes :

- **Temps d'exécution** : représente le temps nécessaire pour qu'un algorithme termine son exécution.
- **Nombre de trous** : c'est le nombre de trous détectés par un protocole de détection de trou de couverture après son exécution.
- **Taux d'erreur de détection** : c'est le pourcentage de fausse détection qui est définie par la formule suivante :

$$\mathbf{T}_{erreur} = \frac{|S_d - S_r|}{S_r} \times 100$$

avec :

S_d : surface des trous détectés

S_r : surface réelle des trous

4.4 Résultats de simulation

Les nœuds sont déployés d'une manière aléatoire sur une surface de (500x500) m², la Figure 4.1 illustre un exemple de déploiement aléatoire des nœuds dans une zone d'intérêt.

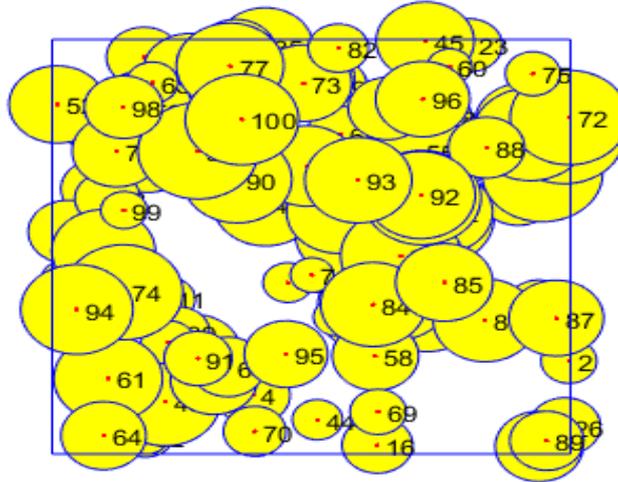


FIGURE 4.1 – Déploiement aléatoire de 100 nœuds.

La figure 4.2 montre les résultats de la simulation de notre approche avec un déploiement aléatoire de 100 nœuds, les limites avec la couleur rouge représente les différents trous détectés en utilisant notre approche. Comme nous pouvons le voir sur la figure, notre approche réussit à détecter tous les trous qui se trouvent dans le réseau quelque soit leur forme.

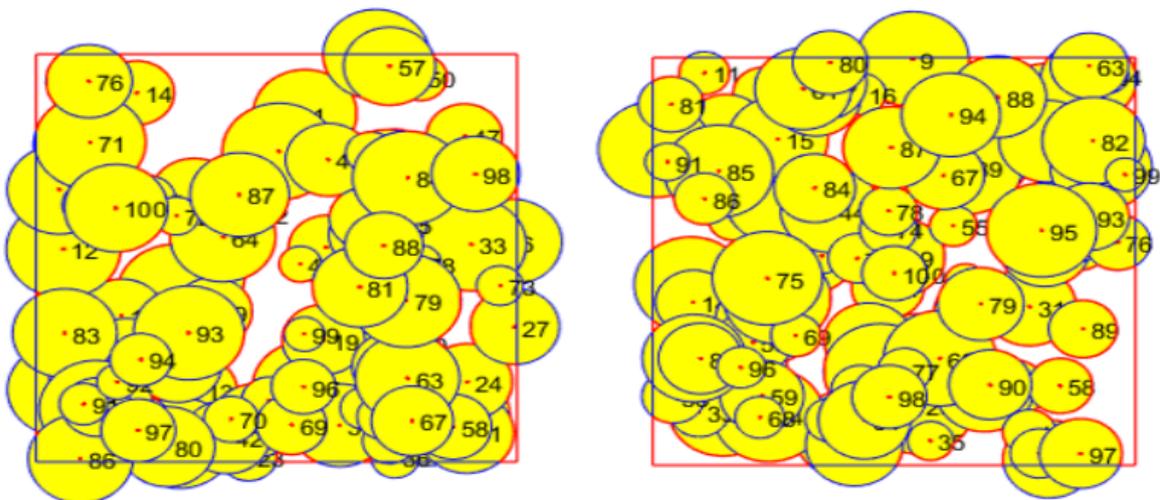


FIGURE 4.2 – Exemples des trous détectés par notre approche.

La figure 4.3 montre le comportement de notre approche par rapport à la variation de la valeur du pas de balayage (Δ) le taux d'erreur de détection est calculé pour des valeurs de pas variant de 1 à 7m. Nous remarquons que plus la valeur du pas augmente, plus le taux d'erreur augmente. Le meilleur taux est obtenu lorsque la valeur du pas est égale à 1m ce qui signifie que notre approche détecte bien les trous lorsque la valeur de Δ est petite. C'est pour cette raison que le pas est fixé à 1m pour toutes les simulations.

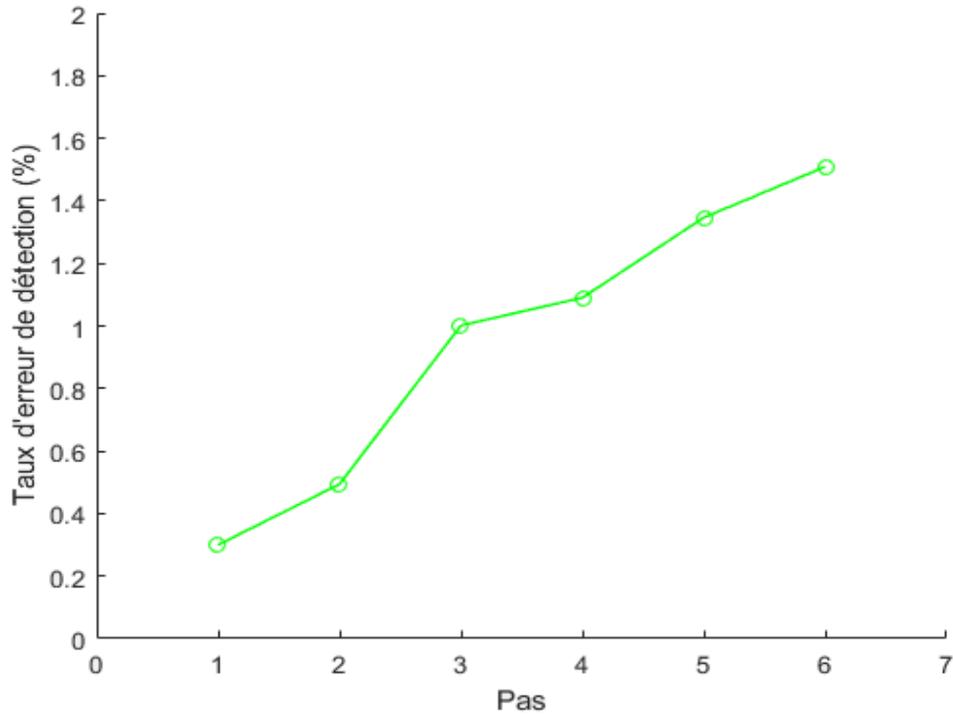


FIGURE 4.3 – Variation du taux d'erreur Vs Pas.

4.4.1 Temps d'exécution

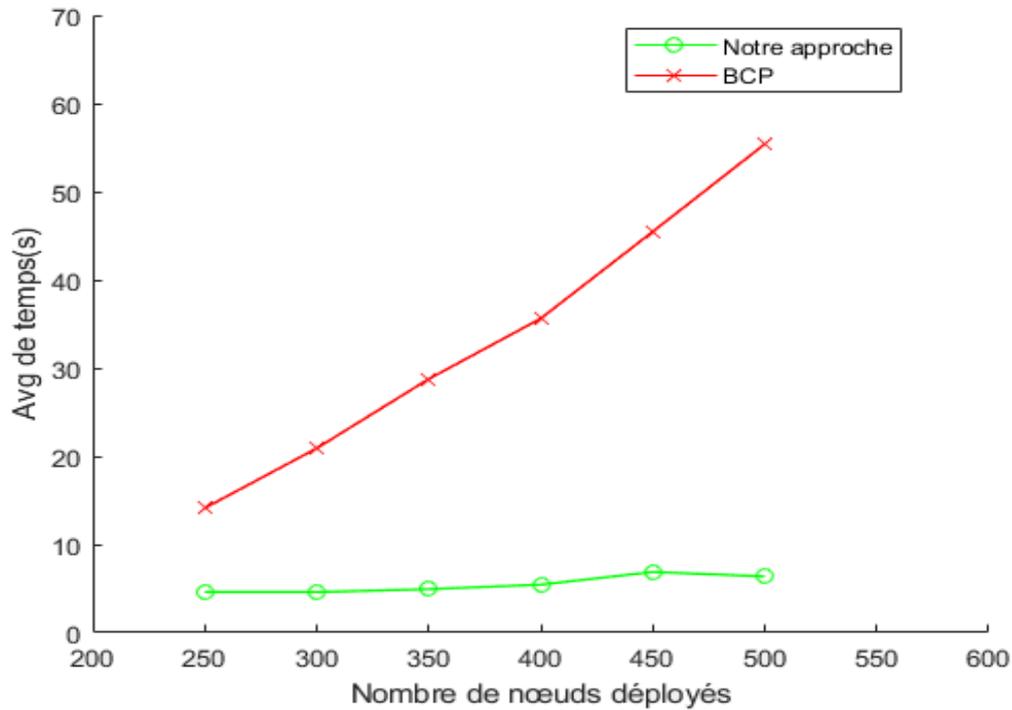


FIGURE 4.4 – Variation du temps d'exécution Vs Nombre de nœuds déployés.

La figure 4.4 montre que notre approche surpasse fortement l'approche BCP en terme de temps d'exécution. Le temps d'exécution de BCP (couleur rouge) a tendance à augmenter très rapidement lorsque le nombre de nœuds déployés augmente, tandis que le temps d'exécution de notre approche (couleur verte) est relativement stable. De plus, même avec un petit nombre de nœuds, le temps d'exécution de BCP est considérablement supérieur au temps d'exécution de notre approche (par exemple avec un déploiement de 250 capteurs, le temps d'exécution de BCP est 14.1194 s alors que le temps d'exécution de notre approche n'est que 4.6139 s).

4.4.2 Nombre de trous

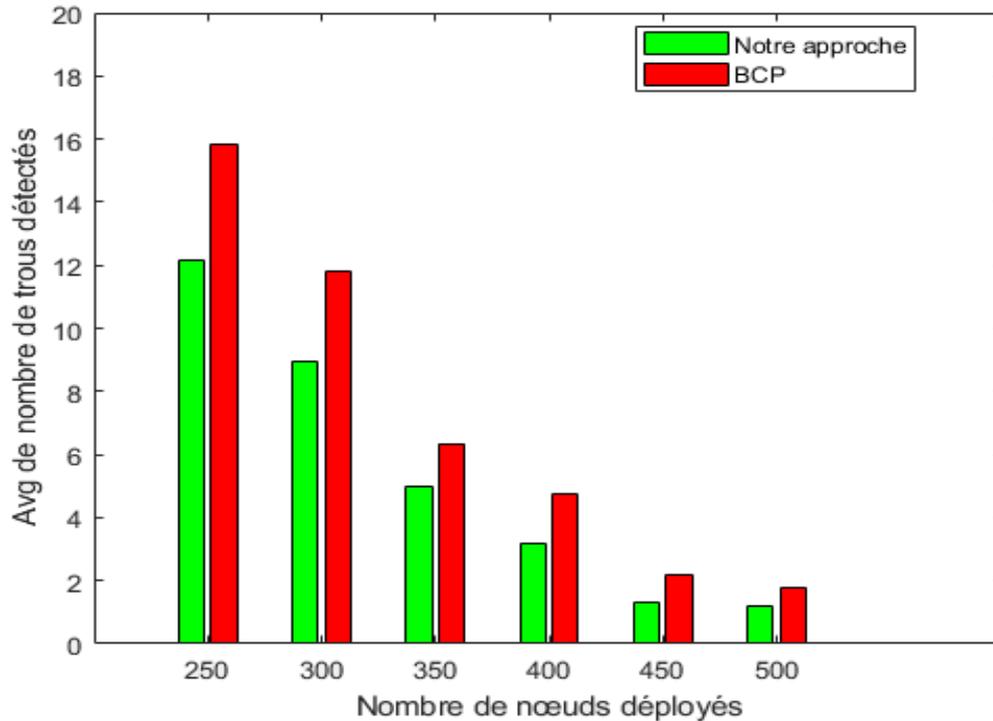


FIGURE 4.5 – Nombre de trous Vs Nombre de nœuds déployés.

Comme nous pouvons le voir, la figure 4.5 montre le nombre de trous détectés par les deux approches, en variant le nombre de nœuds déployés dans le réseau. Pour chaque déploiement le nombre de trous détectés par notre approche (couleur verte) est plus petit que l'approche BCP (couleur rouge), cette différence n'exprime pas l'existence de trous non détectés par notre approche, mais plutôt, à la phase de fusion des trous qui n'est pas prévue par l'approche BCP. En effet, cette phase permet de fusionner plusieurs trous adjacents et de les traiter comme un seul trou. Un trou scindé en plusieurs trous adjacents et indépendants influence sur le nombre de nœuds utilisés dans la correction des trous. Notre approche réussit à détecter les trous tels qu'ils existent dans la zone de déploiement.

4.4.3 Taux d'erreur de détection

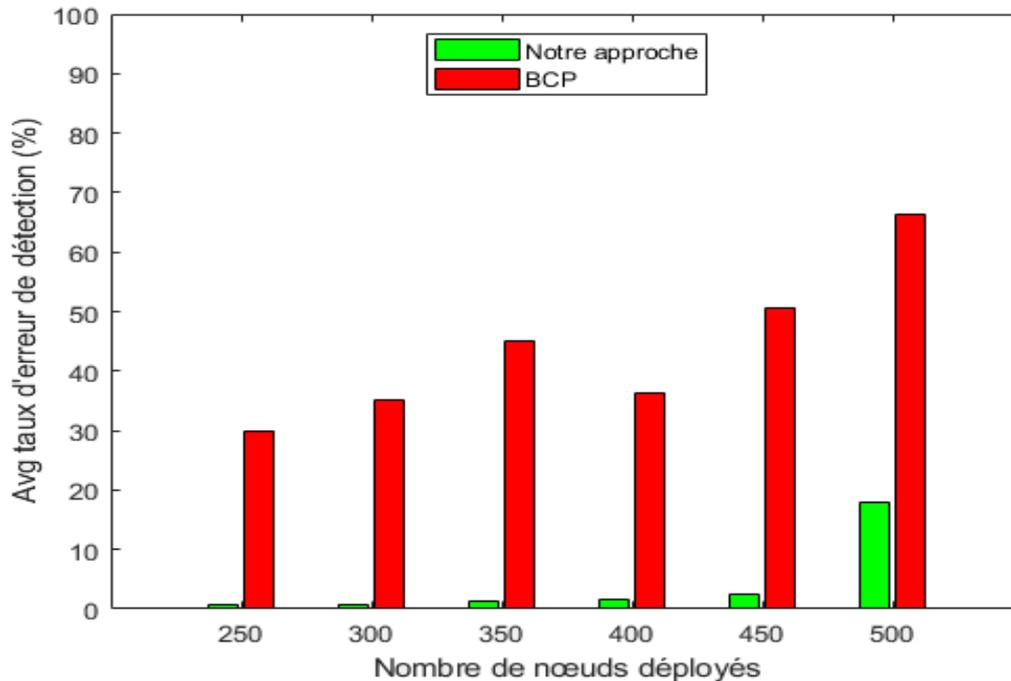


FIGURE 4.6 – Taux d'erreur de détection Vs Nombre de nœuds déployés.

La figure 4.6 représente le taux d'erreur de détection obtenu par les deux approches en fonction du nombre de nœuds déployés. Si nous comparons les résultats, nous remarquons qu'avec BCP (couleur rouge) le meilleur taux d'erreur est obtenu en déployant 250 nœuds et augmente en augmentant le nombre de nœuds jusqu'à atteindre 70% d'erreur avec un déploiement de 500 nœuds tandis que, avec notre approche (couleur verte) le taux d'erreur de détection ne dépasse pas 18% pour un déploiement de 500 nœuds. Cette figure exprime clairement l'efficacité de notre protocole par rapport au protocole BCP.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons implémenté et comparé notre solution avec l'approche proposé dans [31]. En effet, d'après les séries de simulation réalisées, notre approche est plus efficace que BCP notamment en termes de temps d'exécution et le nombre de trous détectés dans le réseau mais aussi en terme de taux d'erreur de détection. La série de simulation peut être étendue pour étudier d'autres métriques de performances telleque l'énergie, cette étude sera la perspective de notre travail.

Conclusion et perspectives

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont une partie intégrante de notre vie, puisqu'ils sont utilisés et appliqués dans plusieurs domaines différents. Cependant, ils constituent toujours un axe de recherche très fertile et de nombreuses problématiques restent à résoudre, afin de mieux exploiter cette technologie. Parmi les problèmes rencontrés dans les RCSFs, nous pouvons citer, la couverture, la communication, la connexité, le routage, etc. Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire à la couverture dans les RCSFs, et en particulier à la détection des trous de couverture.

Pour mener à bien notre travail nous avons commencé par étudier les réseaux de capteurs sans fil de manière générale, nous avons défini les points essentiels relatifs aux RCSFs, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application ainsi que leurs différentes contraintes.

Par la suite, nous avons abordé la notion de couverture ainsi que ses différents types, nous avons présenté les différents algorithmes proposés dans la littérature pour pallier le problème de détection des trous de couverture dans les RCSFs. Les solutions ont été divisées en trois grandes approches (l'approche géométrique, l'approche statistique et l'approche topologique).

Nous avons proposé une nouvelle approche de détection des trous de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, elle se base sur le balayage avec une droite verticale parallèle à l'axe des ordonnées afin de déterminer les segments non-couverts et leurs segments adjacents. Notre solution se déroule en trois phases : la première est le balayage du réseau pour la récupération des segments non-couverts, la deuxième est la détection des trous de couverture, et enfin la troisième est la fusion des trous adjacents.

Afin d'analyser et d'évaluer les performances de notre approche, nous avons utilisé le langage de programmation MATLAB. Les résultats de simulation obtenus ont montré que notre algorithme offre de meilleures performances en termes du temps d'exécution, le nombre de trous détectés et le taux d'erreur de détection en comparaison avec le protocole BCP.

Comme perspectives de recherche, nous pensons à étudier le comportement de notre ap-

proche avec plus de métriques de performances telleque l'énergie, ainsi que de comparer notre approche avec celles qui utilisent des nœuds hétérogènes. Nous envisagerons également de proposer une solution pour corriger les différents trous détectés dans le réseau. L'approche proposée est une approche centralisée, il est également intéressant de la décentraliser pour un équilibrage de l'énergie des nœuds.

Bibliographie

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. IEEE communications magazine, A survey on sensor networks, Vol. 40, No. 8, pp. 102-114, Août 2002.
- [2] M.T. Thai, X. jai, F. Wang. Coverage problems in wireless sensor networks : Designs and Analysis, International journal of sensor networks, Minnesota, January 2008.
- [3] R. Beghdad, A.Lamraoui. Boundary and holes recognition in wireless sensor networks. J. Innov, pp. 1-14, 2016.
- [4] C. Bettstetter. On the connectivity of ad hoc networks, in the computer journal, Vol. 47, No. 4, pp. 432-447, 2004.
- [5] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. Wireless sensor networks : A survey. Computer networks (Elsevier), vol.38, No.4, pp.393-422, Mars 2002.
- [6] W. L. Mezeghrane. Techniques de localisation et de couverture minimale à base de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de doctorat, Option : Cloud computing, Université Abderrahmane MIRA, Béjaïa, 2018.
- [7] M. Ilyas, I. Mahgoub, L. Kelly. Handbook of sensor networks : Compact wireless and wired sensing systems. Boca raton, FL, USA : CRC press, Inc, 2004.
- [8] J. N. Al-karaki, A. Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks : A survey. Wireless sensor networks, 2004.
- [9] A. Imene. Une approche agent mobile pour les réseaux de capteurs, Thèse de doctorat, Option : Technique de l'image et de l'intelligence artificielle, Université Mohamed Khider, Biskra, 2016.
- [10] D. NGOM. Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau, Thèse de doctorat, Option : Réseaux et télécommunications, Université de Haute Alsace, France, 2016.

-
- [11] B. Pazand. Location-free node scheduling Schemes for energy efficient, Fault tolerant and adaptive sensing in wireless sensor networks, Thèse de doctorat, Option : Informatique, Université de Western, Australia, 2008.
- [12] S. P. Singh, S. C. Sharma. *Procedia computer science : A survey on cluster based routing protocols in wireless sensor networks*, vol. 45, pp. 687-695, 2015.
- [13] S. Slijepcevic and M. Potkonjak. Power efficient organization of wireless sensor networks, *IEEE international conference on communications*, Vol. 2, pp. 472-476, 2001.
- [14] C. Karlof, D. Wagner. Secure routing in wireless sensor networks : Attacks and countermeasures. *Ad hoc networks*. *Ad hoc Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 293-315, 2003.
- [15] Y. Derdour. Conception et développement d'un système d'exploration basé sur les réseaux de capteurs sans fil avec sink mobile, Thèse de doctorat, Option : Informatique, Université Ahmed Ben Bela d'Oran, 5 octobre 2015.
- [16] B. Amira. Prolongation de la durée de vie des batteries dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), Thèse de doctorat, Option : Réseaux et sécurité informatique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2015.
- [17] J. Beaudaux. Partitionnement logique dans les réseaux de capteurs sans fil, Mémoire de master, Option : L'informatique de la télédétection, Université de Strasbourg, Août 2010.
- [18] M. BENMAMMAR, D. IDIR. Étude et évaluation des performances des algorithmes de couverture minimale dans un réseau de capteurs sans fil, Mémoire de master, Option : Recherche opérationnelle, Université de bejaia, 2013.
- [19] M. T. Thai, Y. Li, M. Cardei, W. Wu. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks, In *24th annual joint conference of the IEEE computer and communications societies*, vol. 3, pp. 1976-1984, 2005.
- [20] M. Potkonjak, S. Meguerdichian, F. Koushanfar, M. Srivastava. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks, *IEEE infocom 2001*, Vol. 3, pp. 1380-1387, Avril, 2001.
- [21] A. Gallais. Ordonnancement d'activité dans les réseaux de capteurs : l'exemple de la couverture de surface, Thèse de doctorat, Option : Informatique, Université Lille1, France, 2006.
- [22] P. Singh, Y. Ch. Chen. Sensing coverage hole identification and coverage hole healing methods for wireless sensor networks, *Wireless networks*, 2019.

- [23] P. L. Nguyen, K. Nguyend, H. Vuc, J. Yusheng. TELPAC : A time and energy efficient protocol for locating and patching coverage holes in WSNs, *Journal of network and computer applications*, pp. 1-16, Japan, 2019.
- [24] L. Aliouane, M. Benchaiba. HACH : Healing algorithm of coverage hole in a wireless sensor network, *International conference on next generation mobile applications, Services and technologies*, Algeria, 2014.
- [25] L. Aliouane, M. Benchaiba. Distributed coverage hole boundary detection in wireless sensor networks, *Accepted in international conference on advanced networking, Distributed systems and applications INDS*, Algeria, 2014.
- [26] L.H Zhao, W. Liu, H. Lei, R. Zhang, Q. Tan. Detecting boundary nodes and coverage holes in wireless sensor networks, *Key laboratory of instrumentation science & Dynamic measurement, Ministry of education, North University of china, Shanxi, Taiyuan 030051, China*, 2016.
- [27] P. L. Nguyen, K. V. Nguyen, V. Q. Huy, J. Yusheng. A time and energy efficient protocol for locating coverage holes in WSNs, *IEEE 41st conference on local computer networks*, Japan, 2016.
- [28] A. Khelil, R. Beghdad, A. Khelloufi. 3HA : Hybrid hole healing algorithm in a wireless sensor networks, *Wireless personal communications*, Springer, Janvier 2020.
- [29] P. K. Sahoo, M. J. Chiang, L. Wu. An efficient distributed coverage hole detection protocol for wireless sensor networks. *Sensors*, Vol. 16, No. 3, pp. 1-21, Mars 2016.
- [30] W. Li, W. Zhang. Covrage hole and boundry nodes detection in wireless sensor network. *Journal of network and computer application*, 2015
- [31] G. Destino, G. T. Freitas de Abreu. Network boundary recognition via graph-theory, in : *Proceedings of the 5th workshop on positioning, Navigation and communication*, pp. 271-275, 2008.
- [32] W. An, N. Qu, F. M. Shao, X. Xiong, S. Ci. Coverage hole problem under sensing topology in flat wireless sensor networks, *Vol. 2016, No. 16*, pp. 578–589, 2014.
- [33] Z. Kang, H. Yu, Q. Xiong. Detection and recovery of coverage holes in wireless sensor networks. *Journal of network*, Vol. 8, No. 4, Avril 2013.

- [34] Y. Dong, H. Kang, F. Yan, L. Shen, W. Xia. A Homology-based coverage hole detection algorithm in wireless sensor networks, 3rd IEEE international conference on computer and communications, 2017.
- [35] http://www.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html, (Consulté le 29 juillet 2020).

RÉSUMÉ

L'apparition des trous de couverture dans un réseau de capteurs sans fil affecte négativement les performances du réseau, elle a des incidences considérables sur la couverture, la connectivité, les chemins de routage, etc. Par conséquent, la détection de ces trous dès leurs apparitions et procéder à leurs corrections est une condition sine qua none pour le maintien de la stabilité du réseau et garantir la qualité de service. Dans ce mémoire, nous proposons une nouvelle approche pour détecter les trous de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, cette solution se déroule en trois phases, la première consiste à balayer le réseau avec une droite virtuelle afin de trouver les segments non-couverts, la deuxième s'occupe de la détection effective des trous de couverture, et enfin la troisième, consiste à analyser les trous générés pour fusionner tous les trous adjacents. La simulation réalisée et l'étude comparative ont montré que notre approche est très compétitive, puisqu'elle réduit l'erreur moyenne de détection, gagne en précision et en temps d'exécution.

Mot-clés : réseaux de capteurs sans fil, couverture, trous, segments non-couverts.

ABSTRACT

The appearance of holes coverage in a wireless sensor network adversely affects network performance, it has significant implications on coverage, connectivity, routing paths, etc. Consequently, the detection of hole coverage as early as their appearance and proceed to their correction is a sine qua non condition for maintaining the stability of the network and guaranteeing the quality of service. In this brief, we propose a new approach to holes coverage detection in wireless sensor networks, this solution takes place in three phases, the first one is to scan the network with a virtual straight line in order to find the uncovered segments, the second focuses on the effective detection of hole coverage, and finally the third, is to analyze the generated holes in order to merge all adjacent holes. The simulation carried out and the comparative study showed that our approach is very competitive, since it reduces the average detection error, gains in precision and in execution time.

Key-words : wireless sensors networks, coverage, holes, uncovered segments.