

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 de Recherche Opérationnelle



Mémoire de Master

En Recherche Opérationnelle

Spécialité

Fiabilité et Evaluation des Performances des réseaux

Thème

Etude et évaluation des performances des algorithmes de couverture minimale dans un réseau de capteurs sans fil

Réalisé par :

M^r BENMAMMAR Massine

M^r IDIR Dalile

Soutenu devant le jury composé de :

Président	M ^r <i>BAADACHE</i> Abederrahmane	M.C.B U.Béjaïa
Promotrice	M ^{me} <i>BOUALLOUCHE</i> Louiza	M.C.A U.Béjaïa
Co-promoteur	M ^r <i>LARBI</i> Ali	M.A.A U.Béjaïa
Examinatrice	M ^{me} <i>LARBI</i> Wahiba	M.A.B U.Béjaïa
Examineur	M ^r <i>YAZID</i> Mohand	M.A.B U.Béjaïa

Promotion 2012/2013

Remerciements

Nous tenons à remercier le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience jusqu'à l'achèvement de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier aussi Mr LARBI Ali et Mme BOUALLOUCHE Louiza, nos encadreurs, pour leur sympathie, leur disponibilité, leurs conseils et leurs encouragements qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Un grand merci à tous nos collègues en Master 2 et tous les enseignants du département Recherche Opérationnelle, qui nous ont offert un environnement étudiantin extrêmement agréable.

Un merci pudique : à nos familles, pour leur soutien qui nous a poussé à chercher au fond de nous la volonté de faire toujours beaucoup plus, à nos amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents,

A mes frères et ma sœur,

A toute la famille,

A mes amis et collègues, et tous ceux qui m'ont aidé ;

A mon binôme Dalile et sa famille.

BENMAMMAR Massine

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents,

A mes frères et sœurs,

A toute la famille,

A mes amis et collègues, et tous ceux qui m'ont aidé ;

A mon binôme Massine et sa famille.

IDIR Dalile

Résumé

Le problème de la couverture a été examiné minutieusement dans les réseaux de capteurs sans fil durant ces dernières décennies, plusieurs algorithmes ont été proposés pour remédier à ce problème. Le but de ce travail étant de proposer un algorithme distribué de couverture totale de la zone d'intérêt en utilisant un nombre réduit de nœuds actifs afin de conserver l'énergie des capteurs.

Dans ce travail, nous avons contribué à l'extension d'un algorithme de surveillance d'un périmètre à une surveillance de toute la surface de la zone d'intérêt. Une fois que le périmètre est couvert, nous formons des cercles dont le rayon est inférieur au rayon de la zone d'intérêt. Nous avons proposé deux approches pour calculer ce rayon, la première consiste à trouver la distance entre le centre et le point le plus loin non couvert et lui soustraire un pas fixe, pour la seconde approche on soustrait directement un pas fixe du rayon de la zone d'intérêt, la couverture de ces cercles s'effectue de la même manière que la couverture du premier périmètre. Les résultats de la simulations nous indiquent que la première approche assure une couverture totale avec un minimum de capteurs que la seconde approche.

Mots-clés : Réseau de capteurs sans fil, Couverture, Zone d'intérêt, Périmètre, Surveillance.

Abstract

The coverage problem has been carefully considered in wireless sensor networks during the past decades, several algorithms have been proposed to address this problem. The aim of this work, is to propose a distributed algorithm for total coverage of the area of interest using a reduced number of active nodes to conserve the energy of sensors.

In this work, we have contributed to the improvement of an algorithm for monitoring a perimeter to monitoring of the entire surface of the area of interest. Once the perimeter is covered, we form circles with a radius smaller than the radius of the area of interest. We made two approaches to calculate the radius, the first is to find the distance between the center and the furthest point and subtract it uncovered a fixed pitch, and for the second approach a fixed pitch radius of the area is directly subtracted interest, coverage of these circles is done in the same way as the first perimeter. Simulation results indicate that the first approach provides full coverage with a minimum of sensors and the second approach.

Keywords : Wireless sensor networks, Coverage, Area of interest, Perimeter, Monitoring.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

RCSFs	R éseaux de C apteurs sans F il
WSN	W ireless S ensor N etworks
GPS	G lobal P osition S ystem
IDA	I mprecise D etections A lgorithm
PFA	P otential F ield A lgorithm
VFA	V irtual F orce A lgorithm
DSSA	D istributed S elf- S preading A lgorithm
BIDP	B idding P rotocol
ILPA	I nteger L inear P rogramming A lgorithm
UADA	U ncertainty- A ware S ensor D eployment A lgorithm
PEAS	P robing E nvironment A daptative S leeping
OGDC	O pen G eographic D ensity C ontrol

TABLE DES MATIÈRES

Table des Matières	ii
Liste des tableaux	v
Table des figures	vi
Introduction Générale	1
1 Introduction au Problème de Couverture dans les RCSFs	3
1.1 Introduction	3
1.2 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	3
1.2.1 Définition d'un capteur	3
1.2.2 Architecture d'un capteur	4
1.2.2.1 Architecture Matérielle	4
1.2.2.2 Architecture Logicielle	5
1.2.3 Définition d'un réseau de capteurs sans fil	5
1.2.4 Architecture d'un réseau de capteur sans fil	5
1.2.4.1 Champ de captage (espace de collecte)	6
1.2.4.2 Nœuds capteurs	6
1.2.4.3 Station de base (sink, puits)	6
1.2.4.4 Centre de traitement des données (gestionnaire des tâches)	6
1.2.5 Architecture protocolaire	6
1.2.6 Caractéristiques des RCSFs	8
1.2.7 Domaines d'application des RCSFs	9
1.2.7.1 Applications militaires	9
1.2.7.2 Applications médicales	9

1.2.7.3	Applications de la surveillance	9
1.2.7.4	Applications environnementales	9
1.2.7.5	Applications commerciales	10
1.2.7.6	La domotique	10
1.2.8	Contraintes de conception des RCSF	10
1.2.8.1	Tolérance aux fautes	10
1.2.8.2	Passage à l'échelle	10
1.2.8.3	Les coûts de production	11
1.2.8.4	L'environnement	11
1.2.8.5	La topologie de réseau	11
1.2.8.6	Les contraintes matérielles	11
1.2.8.7	La consommation d'énergie	11
1.2.8.8	Canal radio	12
1.3	Communication dans les RCSFs	12
1.3.1	Mode de communication	12
1.3.2	Mode événementiel	12
1.3.3	Mode périodique	13
1.3.4	Mode à la demande	13
1.4	Principaux domaines de recherche dans les RCSFs	14
1.4.1	Efficacité énergétique	14
1.4.2	Routage	14
1.4.3	Sécurité	14
1.4.4	Couverture	15
1.5	Problème de la couverture dans les RCSFs	15
1.5.1	Critères de classifications du problème de la couverture	15
1.5.2	Type de couverture	16
1.5.2.1	Couverture d'une zone	16
1.5.2.2	Couverture de points	17
1.5.2.3	Couverture de barrière	17
1.5.3	Ordonnancement d'activité dans les RCSFs	18
1.5.4	Gestion de l'ordonnancement	19
1.5.4.1	Approche centralisée	19
1.5.4.2	Approche hiérarchique	19
1.5.4.3	Approche localisée	20
1.6	Conclusion	20

2	Etat de l'Art sur les Algorithmes de Couverture dans un RCSF	21
2.1	Introduction	21
2.2	Préliminaires	22
2.2.1	Propriétés des nœuds capteurs	22
2.2.2	Modèles de couverture	22
2.2.2.1	Modèle du disque binaire	22
2.2.2.2	Modèle probabiliste	22
2.2.3	Métriques d'évaluations des algorithmes de couverture	23
2.3	Etude de quelques algorithmes de couverture	24
2.3.1	Couverture basée sur la stratégie de déploiement des capteurs	24
2.3.1.1	Algorithme imprécis de détections(IDA)	25
2.3.1.2	Algorithme du champ potentiel (PFA)	26
2.3.1.3	Algorithme de force virtuel (VFA)	27
2.3.1.4	Algorithme de distribution et d'auto-propagation (DSSA)	28
2.3.1.5	Protocol d'appel d'offre (BIDP)	29
2.3.1.6	Algorithme de programmation linéaire (ILPA)	30
2.3.1.7	Algorithme de déploiement de capteur au courant de l'incertitude(UADA)	30
2.3.1.8	Comparaison des algorithmes de déploiement	31
2.3.2	Couverture basée sur les chemins de l'exposition	34
2.3.2.1	Chemin d'une exposition minimale : le pire cas de couverture	35
2.3.2.2	Chemin d'exposition maximal : le meilleur cas de couverture	36
2.3.2.3	Chemin de rupture maximal : le pire cas de couverture	37
2.3.2.4	Chemin du support maximal : le meilleur cas de couverture	39
2.3.3	Stratégies diverses	40
2.3.3.1	Algorithme basé sur le sondage de l'environnement	40
2.3.3.2	Algorithme OGDC (Open Geographic Density Control)	42
2.4	Conclusion	45
3	Contribution à la Couverture d'une Zone dans un RCSF Hétérogène	46
3.1	Introduction	46
3.2	Motivations	46
3.3	Algorithme de référence	47
3.3.1	Enoncé du problème et définitions	47
3.3.1.1	Définitions	47
3.3.2	Hypothèses de l'algorithme	49
3.3.2.1	Principe de fonctionnement de l'algorithme ICPA	50

3.4	Contribution	51
3.4.1	Etapes de couverture d'une surface	52
3.5	Exemple d'application	56
3.5.1	Première itération	57
3.5.2	Deuxième itération	58
3.6	Conclusion	60
4	Simulation et Evaluation des Performances	61
4.1	Introduction	61
4.2	Environnement de la simulation	61
4.2.1	Choix du langage de programmation	61
4.2.2	Variables descriptives du système	62
4.3	Les Paramètres de simulation	62
4.3.1	Méthode d'évaluation de la couverture	62
4.3.2	Modèle d'énergie	63
4.4	Les paramètres de performances	64
4.5	Evaluation de performances	64
4.5.1	Support de l'hétérogénéité	68
4.5.2	Choix du pas	70
4.5.3	Efficacité énergétique	71
4.6	Conclusion	72
	Conclusion Générale	73
	Bibliographie	viii

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Tableau comparatif des stratégies de déploiement de capteurs.	34
3.1	Intervalle et angle de couverture	57
3.2	Redéfinition des intervalles de couverture	58
3.3	Intervalles et angles de couverture	59
3.4	Redéfinition des intervalles de couverture	59
4.1	Nombre de nœuds actifs en fonction du nombre de nœuds déployés	65
4.2	Taux de couverture en fonction du nombre de nœuds déployés	66
4.3	Nombre de nœuds actifs en fonction du nombre de nœuds déployés	67
4.4	Taux de couverture en fonction du nombre de capteurs déployés	68

TABLE DES FIGURES

1.1	Les composants d'un nœud capteur	4
1.2	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.	5
1.3	Pile protocolaire d'un réseau de capteur.	7
1.4	Mode de communication événementiel.	12
1.5	Mode de communication périodique.	13
1.6	Mode de communication à la demande.	13
1.7	Couverture d'une zone.	17
1.8	Couverture de points.	17
1.9	La couverture de barrière.	18
1.10	Ordonnancement d'activité avec le critère de la couverture de surface.	18
1.11	Trois approches algorithmiques pour l'ordonnancement d'activité.	19
2.1	Algorithme IDA	25
2.2	(a)Polygone de Voronoï.(b)Offre estimée par un capteur s_i la surface du cercle ombragée avec le centre C.	29
2.3	(a)Diagramme de Voronoï de 10 nœuds déployés de manière aléatoire, (b)Polygone de Voronoï pour le nœud S, construit en traçant les bissectrices perpendiculaires de liaison S et ses voisins, (c)Triangulation de Delaunay pour le même ensemble de nœuds.	38
2.4	Diagramme de transition d'état du protocole PEAS.	41
2.5	Diagramme de transition des états des nœuds capteurs.	43
3.1	La relation entre la région d'intérêt Q et les nœuds.	48
3.2	Intersection de deux cercles.	53
3.3	Couverture du premier périmètre	58
3.4	Couverture du deuxième périmètre	59
3.5	Couverture de zone	60

4.1	Méthode d'évaluation de la couverture	62
4.2	Le modèle d'énergie	63
4.3	Variation du nombre de nœuds actifs en fonction du nombre de nœuds déployés	65
4.4	Variation du taux de couverture en fonction du nombre de nœuds déployés	66
4.5	Variation du nombre de nœuds actifs en fonction du nombre de nœuds déployés	67
4.6	Variation du taux de couverture en fonction du nombre de nœuds déployés	68
4.7	Variation du nombre de nœuds actifs en fonction du nombre de nœuds déployés	69
4.8	Variation du taux de couverture en fonction du nombre de nœuds déployés	69
4.9	Variation du nombre de nœuds actifs et du taux de couverture en fonction du pas	70
4.10	Surveillance d'une zone par des barrières	71
4.11	Variation de l'énergie restante en fonction du nombre de nœuds actifs	71

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis leur création, les réseaux de communication sans fil ont connu un succès sans cesse croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Grâce à ses divers avantages, cette technologie a pu s’instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux actuelles. Au cours de son évolution, le paradigme sans fil a vu naître diverses architectures dérivées, telles que : le réseau cellulaire, le réseau local sans fil et autres. Durant cette dernière décennie, une architecture nouvelle a vu le jour : le réseau de capteurs sans fil. Ce type de réseau peut être vu comme un réseau de micro-systèmes disséminés dans un espace donné et communiquant entre eux via une liaison sans fil. L’espace où agissent les capteurs s’appelle un champ de captage. Ce qui est intéressant dans les réseaux de capteurs, c’est que les nœuds sont souvent composés d’un grand nombre de micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d’une manière autonome.

Les capteurs sans fil sont généralement conçus pour être déployés en forte densité dans des endroits hostiles et inaccessibles, ils deviennent alors à usage autonome en raison de l’impossibilité de remplacer ou recharger leurs batteries. La consommation d’énergie est alors distribuée en exploitant la redondance induite par le déploiement aléatoire ; des nœuds sont actifs tandis que d’autres demeurent passifs, économisant ainsi leur énergie. Cette topologie dynamique ne doit pourtant pas mettre en péril l’application de surveillance. C’est pourquoi les nœuds actifs doivent couvrir une zone aussi large que l’ensemble des capteurs déployés. De plus, il est indispensable d’assurer l’acheminement des rapports en provenance des capteurs vers les stations puits chargées de stocker et de traiter les données. L’ensemble des nœuds actifs doit également être connecté.

Dans le but d'exploiter le déploiement aussi longtemps que possible, une gestion de ressource rigoureuse en termes d'énergie sera exigée. Pour ce faire, l'activité des capteurs est ordonnancée, certains sont en mode sommeil et économisent leur énergie pendant que d'autres participent à la surveillance. Parmi les critères d'ordonnancement, on citera la couverture de surface qui est l'une des mesures, les plus importantes, pour évaluer la qualité de surveillance produite par un réseau de capteurs dans une zone géographique. Une zone est dite couverte, si tous les points qu'elle inclut sont observés par au moins un capteur.

Dans ce mémoire, nous présentons notre contribution à maintenir la couverture totale d'une surface dans les réseaux de capteurs et ce en commençant par un algorithme de couverture d'un périmètre, ensuite nous passons à son amélioration et à son extension. L'algorithme divise la durée de vie du réseau en périodes d'activité successives. Dans chaque période, un nombre réduit de nœuds actifs est sélectionné pour couvrir la zone de déploiement, ce qui réduit la consommation d'énergie et par conséquent, prolonge la durée de vie du réseau.

Ce manuscrit est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est constitué de deux parties, l'une présente une description des réseaux de capteurs sans fil et l'autre est une étude du problème de la couverture où nous décrivons les types de la couverture ainsi que la technique d'ordonnancement d'activité des capteurs selon le critère de couverture.

Le deuxième chapitre est un état de l'art sur les algorithmes de couverture minimale qui seront classés en trois types : couverture basée sur les stratégies de déploiements qui utilisent des nœuds statiques, mobiles et mixtes ; couverture basée sur les chemins d'exposition pour détecter une cible en mouvement et des algorithmes qui assurent la pérennité du réseau.

Le troisième chapitre est consacré à notre contribution pour la couverture d'une surface, on y trouve une description détaillée d'un algorithme proposé pour la couverture d'un périmètre dans les réseaux de capteurs sans fil avec un ensemble minimal de capteurs.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation, où des résultats de comparaison sont présentés.

Enfin, nous concluons ce travail en dégageant plusieurs pistes de recherche notamment en évoquant les hypothèses de travail qui restent à reconsidérer.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION AU PROBLÈME DE COUVERTURE DANS LES RCSFS

1.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, le développement technologique des réseaux de communication sans fil, a connu un essor important grâce aux avancés technologiques dans divers domaines, tels que la micro-électronique et la miniaturisation. C'est ainsi que de nouvelles voies d'investigation ont été ouvertes, avec l'émergence des réseaux de capteurs sans fil. Des réseaux à hôtes autonomes et à infrastructure non prédéfinie, sont utilisés dans des domaines très variés tels que la détection de flux de radiation, le suivi d'objets en déplacement et leur positionnement.

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord, les réseaux de capteurs sans fil et ce en décrivant leur architecture, leurs caractéristiques, leurs domaines d'application, les contraintes de conception d'un tel type de réseau ainsi, que le type de communication utilisé. Nous consacrerons par la suite le reste du chapitre à l'étude du problème de la couverture.

1.2 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1.2.1 Définition d'un capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.) et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Les progrès conjoints de la microélectronique, des technologies de transmission sans fil et des applications logicielles ont permis de produire à coût

raisonnable des micro-capteurs de quelques millimètres cubes de volume, susceptibles de fonctionner en réseaux[1].

1.2.2 Architecture d'un capteur

1.2.2.1 Architecture Matérielle

Un capteur est composé de quatre unités de base (voir figure 1.1) :

- **L'unité d'acquisition** : elle est généralement composée de deux sous-unités qui sont les capteurs et les convertisseurs analogique-numérique ADCs (Analog Digital Converter). Les capteurs obtiennent des mesures sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques.
 - **L'unité de traitement** : elle est composée de deux interfaces qui sont 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 stocker les données collectées.
 - **Un module de communication (Transceiver)** : il est composé d'un émetteur/récepteur permettant la communication entre les différents nœuds du réseau via un support de communication radio.
 - **Batterie** : elle alimente les unités que nous avons citées, elle n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de la conception de protocoles pour les réseaux de capteurs.
- Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels tels que les systèmes de localisation GPS (Global Position System) et un mobilisateur qui permet de déplacer le capteur en cas de nécessité.

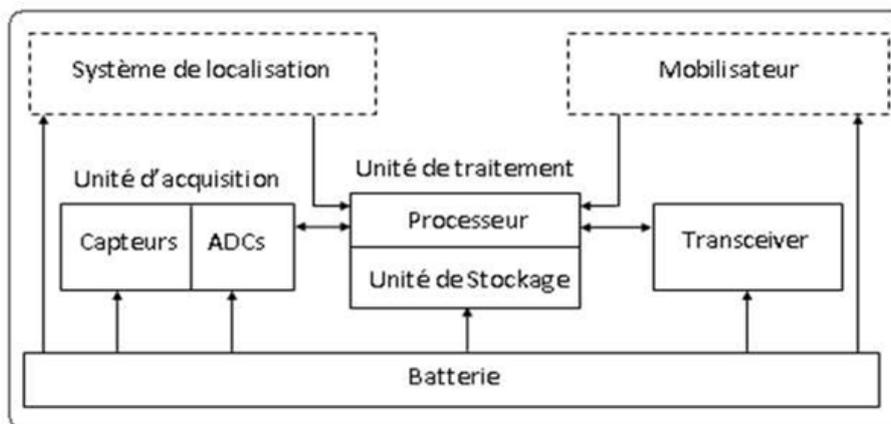


FIGURE 1.1 – Les composants d'un nœud capteur

1.2.2.2 Architecture Logicielle

TinyOS est l'un des systèmes d'exploitation le plus utilisé dans les réseaux de capteurs sans fil. Il dispose d'un modèle de programmation à base de composants implémenté en langage nesC. En effet, il est capable d'intégrer très rapidement les innovations en relation avec l'avancement des applications et des réseaux eux même, tout en minimisant la taille du code source en raison des problèmes inhérents de mémoire dans les réseaux de capteurs. TinyOS est un cadre de programmation pour les systèmes embarqués et un ensemble de composants qui permettent la construction d'un système d'exploitation spécifique à l'application [2].

1.2.3 Définition d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil est un type particulier du réseau Ad-hoc, il est composé d'une station de base et d'un grand nombre de noeuds déployés généralement d'une manière aléatoire dans une zone d'intérêt. Chaque noeud a la capacité de collecté des données et de les transmettre à la station de base. Cette dernière communique les informations collectées à l'utilisateur par internet ou bien par un autre réseau de communication.

1.2.4 Architecture d'un réseau de capteur sans fil

Le réseau de capteurs sans fil est généralement caractérisé par un déploiement dense avec des centaines voire des milliers de nœuds. Les nœuds captent et communiquent leurs données (selon un protocole de communication) afin d'atteindre le nœud central de traitement (connu sous le nom de Sink). L'architecture du réseau est présentée dans la figure 1.2. Le WSN (Wireless Sensor Network) est caractérisé par sa capacité d'auto-organisation, de coopération, de rapidité de déploiement, et de faible coût.

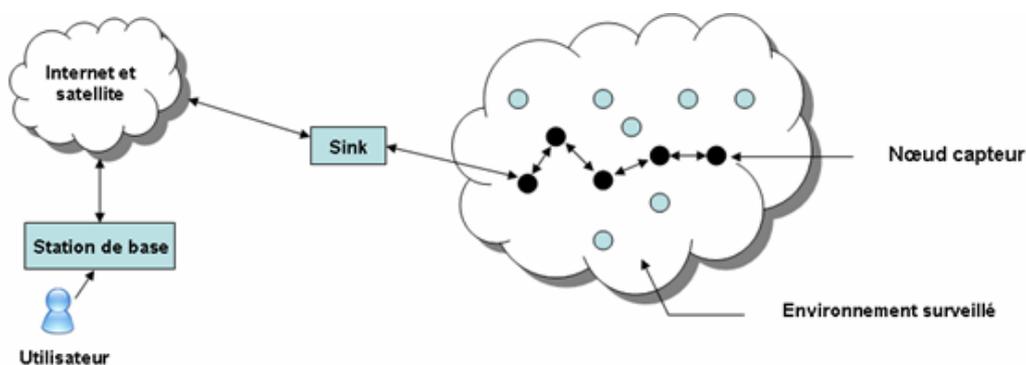


FIGURE 1.2 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.

Dans un réseau de capteurs sans fil (RCSF), nous retrouvons principalement les éléments suivants[1] :

1.2.4.1 Champ de captage (espace de collecte)

Il est considéré comme étant la zone d'intérêt pour l'événement à capter, donc la zone de déploiement des capteurs.

1.2.4.2 Nœuds capteurs

L'élément de base du système, dont le rôle est de collecter les données, pour les envoyer à la station de base.

1.2.4.3 Station de base (sink, puits)

Son rôle est de stocker et de traiter les données reçues des nœuds capteurs et de diffuser les différentes requêtes au réseau. L'une de ses particularités est la source d'énergie illimitée. Le sink peut être un simple nœud doté d'interfaces réseaux supplémentaires, ou par exemple une entité extérieure au réseau (ordinateur portable, PDA, etc).

1.2.4.4 Centre de traitement des données (gestionnaire des tâches)

Il reçoit les données collectées par le sink, son rôle consiste à les regrouper et les traiter pour en extraire les informations utiles.

1.2.5 Architecture protocolaire

Le rôle de ce modèle consiste à standardiser la communication entre les composants du réseau, afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles. Ce modèle comprend 5 couches, qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI, ainsi que 3 couches pour la gestion de la consommation d'énergie, la gestion de la mobilité ainsi que la gestion des tâches. Chaque couche du modèle communique avec une couche adjacente et utilise les services des couches inférieures afin de les fournir à celle du niveau supérieur[3].

La figure 1.3 donne un aperçu de la pile protocolaire dans les réseaux de capteurs[3].

- **Couche physique** : Spécifications des caractéristiques matérielles, des fréquences porteuses, ...etc.
- **Couche liaison de données** : Spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds/routeurs dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des

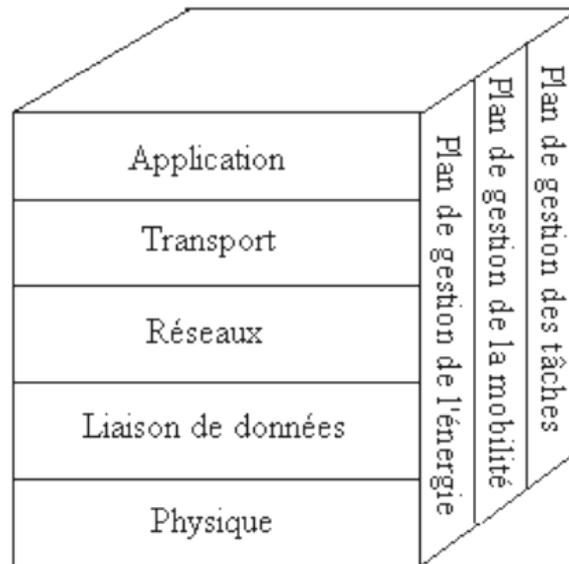


FIGURE 1.3 – Pile protocolaire d'un réseau de capteur.

- données, du contrôle d'erreurs, de l'accès au media,...Elle assure la liaison point à point et multipoint dans un réseau de communication.
- **Couche réseau** : Dans la couche réseau, le but principal est de trouver une route qui soit optimale par rapport à un certain nombre de critères préétablis.
 - **Couche transport** : Cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.
 - **Couche application** : Cette couche assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.
 - **Plan de gestion d'énergie** : Assure l'utilisation optimale de la ressource énergétique. Il s'occupe du contrôle du niveau d'énergie disponible dans le capteur, et assure des fonctionnalités telles que la mise en veille du capteur dans les moments d'inactivité, ou après envoi d'un message, afin de l'empêcher de le recevoir à nouveau. Il peut aussi se charger d'envoyer des messages aux voisins afin de les informer du niveau critique des batteries.
 - **Plan de gestion des tâches** : Il se charge de la distribution équilibrée des tâches sur les différents nœuds. La nature du capteur et son niveau d'énergie sont les principaux paramètres pris en considération.

- **Plan de gestion de mobilité** : Détecte et enregistre le mouvement des nœuds capteurs afin de permettre à l'utilisateur de changer l'emplacement d'un nœud, l'auto-organisation des nœuds lors du changement de la topologie, etc.

Le système de gestion de mobilité doit donc être capable de commander le nœud pour réaliser les mouvements nécessaires.

1.2.6 Caractéristiques des RCSFs

Parmi les caractéristiques les plus importantes d'un réseau de capteurs, nous citons[4] :

- o **La durée de vie limitée** : Les nœuds capteurs sont très limités par la contrainte d'énergie, ils fonctionnent habituellement sans surveillance dans des régions géographiques éloignées. Par conséquent recharger ou remplacer leurs batteries devient quasiment impossible.

- o **Ressources limitées** : Habituellement les nœuds capteurs ont une taille très petite, ce facteur de forme limite la quantité de ressources qui peuvent être mises dans ces nœuds. En conséquence, la capacité de traitement et de mémoire est très limitée.

- o **Topologie dynamique** : La topologie des réseaux de capteurs change d'une manière fréquente et rapide car : les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (par exemple un champ de bataille), la défaillance d'un nœud capteur peut donc être très probable. De plus, les nœuds capteurs et les nœuds finaux où ils doivent envoyer l'information capturée peuvent être mobiles.

- o **Agrégation des données** : Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs sont très reliées, ce qui implique l'existence de redondances de données. Une approche répondue consiste à agréger les données au niveau des nœuds intermédiaires afin de réduire la consommation d'énergie lors de la transmission de ces données.

- o **La stabilité** : Les réseaux de capteurs engendrent un très grand nombre de capteurs, ils peuvent atteindre des milliers voir des millions de capteurs. Le défi à relever par les RCSFs est d'être capable de maintenir leurs performances avec ce grand nombre de capteurs.

- o **Bande passante limitée** : En raison de la puissance limitée, les nœuds capteurs ne peuvent pas supporter des débits élevés.

1.2.7 Domaines d'application des RCSFs

Les RCSFs sont destinés à surveiller et à observer des phénomènes physiques comme : la température, l'humidité, la pression, le taux de bruit, le mouvement des véhicules et la vitesse.

Ils peuvent se révéler très utiles dans de nombreuses applications, lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement. Parmi les domaines où ces réseaux ont prouvé leurs efficacité, nous pouvons citer les domaines suivants :

1.2.7.1 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, le coût réduit, 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, la reconnaissance, etc[5].

1.2.7.2 Applications médicales

Le champ de contrôle de santé représente un grand marché pour les réseaux de capteurs sans fil qui a tendance à croître très rapidement. Ces réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou bien implantés sous la peau, afin de recevoir des images en temps réel d'une partie du corps sans aucune chirurgie pendant environ 24h. On peut ainsi surveiller la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle[6].

1.2.7.3 Applications de la surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance.

1.2.7.4 Applications environnementales

Le contrôle des paramètres environnementaux par les réseaux de capteurs peut donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par la suite faciliter la lutte contre les

feux de forêt avant leur propagation. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air. De même leur déploiement dans les sites industriels empêche les risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.). Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole.

1.2.7.5 Applications commerciales

Des nœuds capteurs peuvent être utilisés pour améliorer les processus de stockage et de livraison. Le réseau peut ainsi être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'une marchandise. Un client attendant une marchandise peut alors avoir un avis de livraison en temps réel et connaître la position des marchandises qu'il a commandées[7].

1.2.7.6 La domotique

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, ...etc[8]. Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance.

Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière s'éteint et la musique se met en état d'arrêt quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, le déclenchement d'une alarme par le capteur anti-intrusion quand un intrus veut accéder à la maison.

1.2.8 Contraintes de conception des RCSF

1.2.8.1 Tolérance aux fautes

Le principe de la tolérance aux fautes est de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs. Certains nœuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence. Ces problèmes ne doivent pas affecter le reste du réseau.

1.2.8.2 Passage à l'échelle

Le nombre de nœuds déployés pour un projet peut atteindre le million. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions et nécessite que le puit "sink " soit

équipé de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues.

1.2.8.3 Les coûts de production

Souvent, les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel. Actuellement un nœud ne coûte souvent pas beaucoup plus que 1\$. A titre de comparaison, un nœud bluetooth, pourtant déjà connu pour être un système low-cost, revient environ à 10\$ [9].

1.2.8.4 L'environnement

Les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille au delà des lignes ennemies, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés,... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.

1.2.8.5 La topologie de réseau

Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : Déploiement, Post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...), Redéploiement de nœuds additionnels.

1.2.8.6 Les contraintes matérielles

La principale contrainte matérielle est la taille du capteur, ainsi son adaptabilité et sa résistance aux différents environnements (forte chaleurs, eau, ...) vu qu'il est souvent déployé dans des endroits hostiles.

1.2.8.7 La consommation d'énergie

Un capteur est limité en énergie ($< 1.2V$). Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (multi-sauts) chaque nœud collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un re-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation.

1.2.8.8 Canal radio

Les capteurs d'un RCSF sont reliés entre eux par un médium sans fil qui est très hostile. La qualité du signal de transmission peut être dégradée à cause des collisions, des interférences, des diffractions, des réfractions, etc...

1.3 Communication dans les RCSFs

Les capteurs sont généralement déployés dans un environnement et sont attachés à une station de base appelée puits. Ces capteurs doivent coopérer entre eux pour s'auto-organiser et s'auto configurer afin de constituer un réseau de capteurs. Ainsi, ils doivent permettre une communication multi sauts pour les données qui circulent dans la zone de capture vers la station de bases.

1.3.1 Mode de communication

Il existe trois modes de communication pour les réseaux de capteurs [9] :

1.3.2 Mode événementiel

Les capteurs envoient vers le puits des données dès qu'un événement précis a été détecté (voir figure 1.4)). Par exemple, pour une application de gestion de déchets et de conteneurs de verres. Quand les capteurs détectent un dépassement d'un seuil de remplissage d'un conteneur, ils envoient cet événement détecté vers le nœud puits. Ce dernier va informer les autorités de la commune pour envoyer un camion pour décharger ce conteneur.

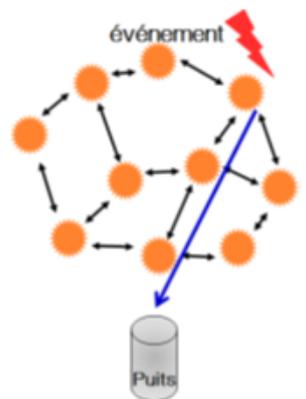


FIGURE 1.4 – Mode de communication événementiel.

1.3.3 Mode périodique

Les capteurs envoient périodiquement des informations de l'environnement vers le nœud puits (voir figure 1.5). Un exemple d'application dans le monde agricole. Les capteurs sont déployés dans un champ pour surveiller l'état du sol. Ils envoient périodiquement des informations sur l'état du sol pour optimiser les apports d'eau et de nutriments.

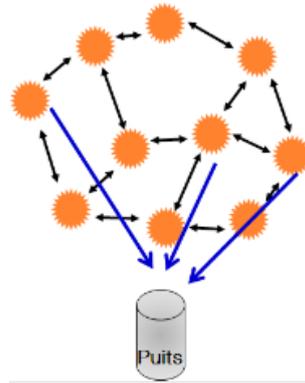


FIGURE 1.5 – Mode de communication périodique.

1.3.4 Mode à la demande

Le puits envoie une requête à un ou un ensemble de nœuds demandant de lui envoyer des données (voir figure 1.6). Un exemple typique de ces applications est la télé-relève de compteur d'eau. Dans ces applications des capteurs sont déployés avec les compteurs d'eau pour surveiller la consommation des clients. Le nœud puits peut être présenté comme un technicien ayant un appareil de collecte de données. Une fois devant l'immeuble où il doit collecter des informations, le technicien envoie avec son nœud puits une demande de collecte d'information. Quand la demande est reçue par le(s) nœud(s) destination, ce(s) dernier(s) va (vont) répondre en envoyant les informations requises par le nœud puits.

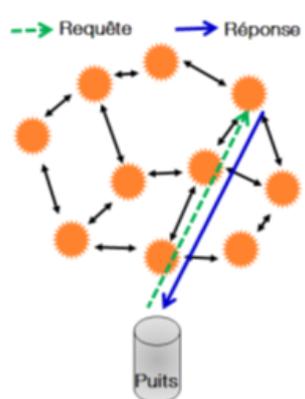


FIGURE 1.6 – Mode de communication à la demande.

1.4 Principaux domaines de recherche dans les RCSFs

L'apparition des réseaux de capteurs sans fil ont fait naître plusieurs travaux de recherche visent à proposer des solutions optimales et efficaces à un ou plusieurs problèmes illustrés précédemment. Les principaux domaines de recherche abordés dans les RCSFs sont les suivants :

1.4.1 Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique doit être l'une des préoccupations principales dans les réseaux de capteurs sans fil, car ces derniers sont alimentés par des batteries de faible autonomie, pour cette dernière raison, plusieurs solutions, à la fois du matériel et des logiciels, ont été proposées afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie[10].

1.4.2 Routage

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil est basé sur le principe des réseaux Ad-Hoc multi-sauts, car la communication des données est effectuée de nœud en nœud jusqu'à ce qu'elles arrivent à la destination. Plusieurs protocoles de routage ont été proposés pour les RCSFs pour minimiser les coûts de communication, afin de réduire la consommation énergétique.

1.4.3 Sécurité

Les RCSFs sont déployés, la plupart du temps, dans des zones accessibles, ce qui engendre plus de risques d'attaques physiques. De plus, les capteurs qui les constituent sont limités en termes d'énergie, de puissance de calcul et de capacité de communication. Par conséquent, les techniques de sécurité utilisées dans les réseaux traditionnels sont inadaptées aux RCSFs ; ce qui oblige les spécialistes à développer de nouvelles solutions de sécurité adéquates à ces derniers. Les principaux objectifs de la sécurité sont :

1. **Authentification** : action de vérifier qu'un nœud correspond bien à ce qu'il prétend et/ou qu'une donnée provient d'ou elle est censée provenir.
2. **Intégrité** : une donnée ne doit subir aucune modification au cours de son acheminement vers le puits.
3. **Confidentialité** : une donnée ne doit être accessible qu'aux seuls nœuds autorisés.
4. **Non-répudiation** : s'assurer qu'un nœud ne pourra pas répudier ses actes (ex. réception et émission).

1.4.4 Couverture

La couverture de zone dans les RCSFs est l'un des problèmes important abordé dans la littérature. Ce dernier est centré autour d'une question fondamentale : comment assurer la surveillance d'une zone d'intérêt donnée? [11]

Le concept de la couverture de surface consiste à décider de l'activité des nœuds, qui peuvent être en état actif ou de veille, tout en conservant une couverture aussi complète que possible de la zone sur laquelle le réseau a été déployé [12].

1.5 Problème de la couverture dans les RCSFs

L'un des objectifs majeurs des réseaux de capteurs 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 (SR) représente la distance euclidienne maximale à laquelle un noeud est capable de percevoir un évènement, de récolter des informations pertinentes concernant son environnement [13].

1.5.1 Critères de classifications du problème de la couverture

Les différentes formulations du problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sont classifiées selon les critères suivants :

Objectifs du problème

L'objectif du problème de la couverture est d'envisager un réseau de capteur sans fil (WSN) dans lequel le périmètre d'un objet ciblé doit être surveillé. Celui-ci est entouré par des capteurs répartis de façon aléatoire. Chaque capteur peut seulement surveiller une partie du périmètre, et peut communiquer uniquement avec ses voisins. Nous tenons à identifier un ensemble de capteurs qui permet de surveiller l'ensemble du périmètre. Pour économiser l'énergie, le nombre de capteurs requises devrait être réduit au minimum.

Méthode de déploiement des capteurs

La méthode de déploiement des capteurs sur une zone d'intérêt diffère selon les conditions de l'environnement. Pour cela, différentes méthodes de déploiement existent, déploiement aléatoire, où la position des capteurs n'est pas connue a priori, est utilisée dans les environnements difficiles.

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

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, on parle de réseau hétérogène.

L'énergie

La taille des capteurs et leurs déploiement généralement dans des zones hostiles et inaccessibles, fait que leur source d'énergie, généralement sous forme de batterie, qui sont limitées en terme d'énergie, est (presque) impossible à recharger.

La connectivité

La connectivité est la propriété d'avoir au moins un chemin entre tout capteur et la station de base. Ceci afin de garantir l'acheminement des informations collectées en tout moment et que tous les nœuds soient joignables à partir de la station de base.

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, ce qui se restreindra aux informations locales, et donc une exécution parallèle du protocole. Les algorithmes centralisés requièrent des informations globales sur le réseau.

1.5.2 Type de couverture

Le problème de la couverture peut être classé en trois types[15][16] :

1.5.2.1 Couverture d'une 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 (ou bien une région). La figure 1.7 montre un exemple d'un déploiement aléatoire des capteurs pour couvrir une zone en forme de carré.

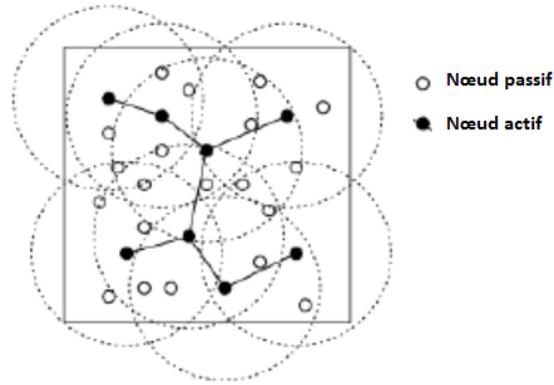


FIGURE 1.7 – Couverture d’une zone.

1.5.2.2 Couverture de points

L’objectif principal dans ce type de problème est de couvrir un ensemble de points spécifiques, dont la position géographique est connue. La figure 1.8 montre un exemple d’un ensemble de capteurs déployés au hasard pour couvrir un ensemble de points (petits carrés) où les nœuds noirs reliés forment l’ensemble des capteurs actifs.

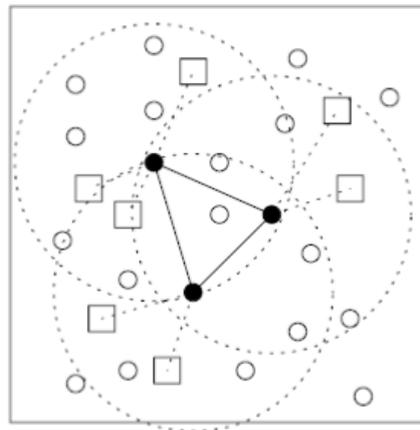


FIGURE 1.8 – Couverture de points.

1.5.2.3 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 1.9 représente un problème de couverture de barrière dans laquelle les points de début et de fin de la trajectoire sont choisis parmi les lignes de fond et la limite supérieure de la zone. Le choix de la voie dépend de l’objectif.

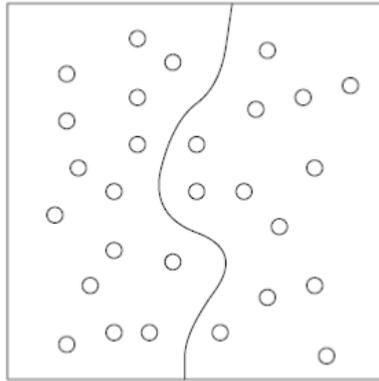
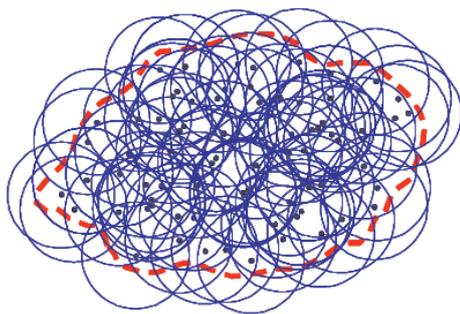


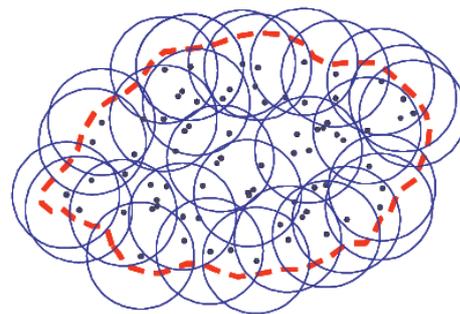
FIGURE 1.9 – La couverture de barrière.

1.5.3 Ordonnancement d'activité dans les RCSFs

Les réseaux de capteurs sont généralement denses et redondants. En effet, suivant l'application, on déploiera plus ou moins de capteurs dans un souci d'allongement de la durée de vie de l'application. À tout moment, il existe donc des capteurs qui observent une même portion de la zone de déploiement. Cette redondance est exploitée par l'ordonnancement d'activité 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. La figure 1.10 illustre ce principe en optimisant le nombre de capteurs actifs, ceci afin d'étendre la durée de vie du réseau.



(a) Un réseau de capteurs déployé.



(b) Seule une partie des nœuds est nécessaire à la couverture de la zone.

FIGURE 1.10 – Ordonnancement d'activité avec le critère de la couverture de surface.

1.5.4 Gestion de l'ordonnancement

L'ordonnancement d'activité peut se faire de diverses façons. Nous distinguons ici les approches centralisées (où une entité centrale connaît chaque nœud et est capable d'influer sur chacun pour lui assigner ses tâches) des approches hiérarchiques (une vision hiérarchisée du réseau où l'autorité centrale est démultipliée selon plusieurs entités responsables d'une sous-partie du réseau) et des approches localisées, par conséquent totalement décentralisées, dans lesquelles un comportement global cohérent doit être obtenu à partir de décisions prises localement [14].

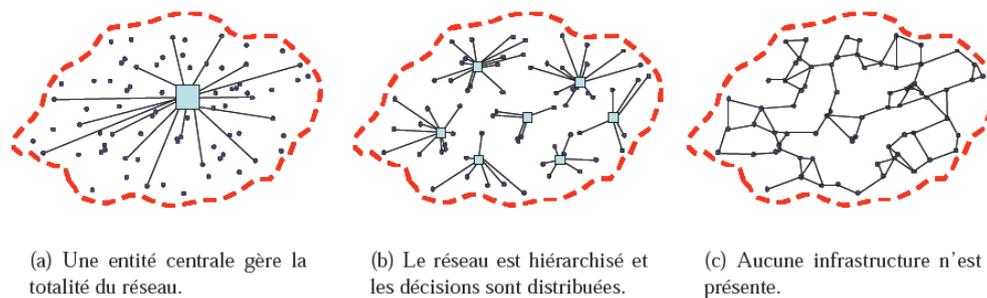


FIGURE 1.11 – Trois approches algorithmiques pour l'ordonnancement d'activité.

1.5.4.1 Approche centralisée

Dans les solutions d'ordonnancement centralisées, il faut pouvoir bénéficier d'une entité centrale ayant vue sur tout le réseau. Cette entité, représentée par un carré sur la figure 1.11(a), peut ainsi assigner à chaque objet 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 objets concernés. On trouve ce genre d'utilisation 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. On retrouve également ces approches dans les applications de surveillance de structure, chargées de signaler toute anomalie dans l'édifice. Ces solutions d'ordonnancement ne sont donc adaptées que lorsque l'environnement peut être atteint et qu'une infrastructure existe ou peut y être déployée.

1.5.4.2 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 1.11(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.

1.5.4.3 Approche localisée

Les approches localisées ne reposent sur aucune infrastructure et n'ont pas vocation à hiérarchiser le réseau. 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. Aucune hiérarchie ni infrastructure n'existe comme illustré sur la figure 1.11(c). Le comportement de chaque objet 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.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités et les concepts de base relatifs aux réseaux de capteurs sans fils qui constituent un domaine de recherche très vaste vu leurs importances. Ce domaine porte sur le développement de nouvelles solutions pour de nombreux problèmes, en particulier celui de la couverture et la technique d'ordonnancement d'activité.

Par ailleurs, la couverture est l'un des problèmes majeurs des réseaux de capteurs qui a pour objectif de surveiller une zone ou un ensemble de cibles le plus longtemps possible. Le chapitre suivant se focalise sur les algorithmes proposés dans la littérature pour résoudre un tel problème.

CHAPITRE 2

ETAT DE L'ART SUR LES ALGORITHMES DE COUVERTURE DANS UN RCSF

2.1 Introduction

Un critère important pour être en mesure de déployer un réseau de capteurs efficace est de trouver des stratégies optimales de placement des nœuds. Le déploiement des nœuds dans les grands champs de détection nécessite un contrôle de topologie efficace [39]. Ils peuvent être soit placés manuellement à des endroits prédéterminés ou être largués d'un aéronef. Cependant, puisque les capteurs sont éparpillés au hasard dans la plupart des situations pratiques, il est difficile de trouver une stratégie de déploiement aléatoire qui minimise les coûts de la communication et résiste aux pannes des nœuds et offre un haut degré de couverture de zone [40]. Une fois les nœuds sont déployés dans le champ de détection, ils forment un réseau de communication. Le réseau peut être vu comme un graphe de communication, où les nœuds capteurs représentent les sommets du graphe et la voie de communication entre deux nœuds quelconques forme une arête.

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur les algorithmes de couverture minimale dans les réseaux de capteurs sans fils.

2.2 Préliminaires

2.2.1 Propriétés des nœuds capteurs

a) Nœuds fixes

Les nœuds fixes ont la capacité de collecter les données captées, d'envoyer ou de recevoir des messages et d'effectuer des traitements dans les réseaux de capteurs sans fil. En général, ces nœuds capteurs gardent leur emplacement une fois qu'ils sont déployés dans une zone d'intérêt.

b) Nœuds mobiles

les nœuds de réseaux de capteurs mobiles sont capables de se déplacer dans le champ de détection et ils ont toutes les caractéristiques que dispose un nœud fixe.

2.2.2 Modèles de couverture

Chuan Zhu et al. [41] ont distingué deux modèles de couverture :

2.2.2.1 Modèle du disque binaire

Le modèle le plus simple est le modèle du disque binaire, selon lequel un nœud est capable de détecter uniquement des points qui se trouvent à sa portée de détection. Ainsi, dans ce modèle, la zone de détection pour chaque nœud est limitée par un disque circulaire de rayon R_c , qui est appelé le rayon de détection (ou bien le rayon de couverture).

$$c_{xy}(S_i) = \begin{cases} 1 & \text{Si } d(S_i, P) < R_c \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.1)$$

Où

- S_i : le $i^{\text{ème}}$ capteur ;
- P : un point de coordonné (x,y) ;
- $d(S_i, P)$: la distance euclidienne entre le nœud S_i et le point P .

2.2.2.2 Modèle probabiliste

Le modèle probabiliste de détection est une extension du modèle de détection de disque binaire. Mathématiquement, le modèle probabiliste se formule comme suit :

$$c_{xy}(S_i) = \begin{cases} 0 & \text{Si } R_c + R_e \leq d(S_i, P) \\ \exp^{-\lambda\alpha^\beta} & \text{Si } R_c - R_e < d(S_i, P) < R_c + R_e \\ 1 & \text{Si } R_c - R_e \geq d(S_i, P) \end{cases} \quad (2.2)$$

Où

- R_c : le rayon de capture
- R_e : la mesure de l'incertitude de détection du capteur. avec $R_e < R_c$
- $\alpha = d(S_i, P) - (R_c - R_e)$.
- α et β sont les paramètres de probabilité de détection lorsque la cible se situe à une distance supérieure à R_e .
- λ : paramètre de la loi exponentielle.

2.2.3 Métriques d'évaluations des algorithmes de couverture

L'évaluation des performances des algorithmes de couverture est très importante pour l'amélioration de leurs efficacités et leurs précisions dans les réseaux. Les principaux facteurs d'évaluations sont les suivants [41] :

Le nombre de noeuds actifs : Choisir le plus petit nombre de noeuds actifs pour assurer la couverture d'une zone d'intérêt est la solution la plus adéquate en raison de la consommation inutile d'énergie.

L'utilisation d'un mécanisme de position : Les algorithmes comprenant les mécanismes de positions, tel le GPS, sont très coûteux en termes d'énergie. Par conséquent, les algorithmes de couverture, qui n'utilise pas les mécanismes de positions ont un plus grand avantage.

L'efficacité énergétique : Les algorithmes de couverture exigent non seulement une faible consommation d'énergie, mais aussi de maintenir l'équilibre énergétique du réseau.

Le coût de communication : La transmission de données est la principale source de consommation d'énergie d'un noeud capteur. Les algorithmes de couverture qui dispose d'un processus de communication à faible coût sont les plus favorisés.

2.3 Etude de quelques algorithmes de couverture

Dans la section suivante, nous allons décrire différentes techniques qui sont utilisées pour assurer une couverture optimale et la connectivité du réseau, ces approches seront classées en trois catégories principales puis les analysées en fonction de leurs objectifs, leurs hypothèses, la complexité de leurs algorithmes et leur applicabilité pratique, réparties comme suit[] :

1. La couverture basée sur des stratégies de déploiement de capteurs ;
2. La couverture basée sur les chemins de l'exposition ;
3. Des stratégies diverses.

2.3.1 Couverture basée sur la stratégie de déploiement des capteurs

L'un des problèmes de la couverture est la recherche des stratégies de déploiement de capteurs qui permettraient de maximiser la couverture ainsi que de maintenir un graphe du réseau connecté. Plusieurs stratégies de déploiement ont été étudiées pour la réalisation d'une architecture de réseau de capteurs optimal, qui vont minimiser les coûts, assurer une couverture élevée et résister aux défaillances des nœuds.

Dans certaines applications, les emplacements des nœuds peuvent être prédéterminés, les placés à la main ou les déployés à l'aide des robots mobiles, tandis que dans d'autres cas, nous avons besoin de recourir à des méthodes de déploiement aléatoires, telles que saupoudrer les nœuds d'un aéronef. Toutefois, le placement aléatoire ne garantit pas une couverture complète car il est de nature stochastique, donc ce qui entraîne souvent une accumulation de nœuds à certains endroits dans le champ de détection, mais en laissant les autres zones défavorisées.

Certains algorithmes de déploiement essaient de trouver de nouveaux emplacements optimaux des capteurs après un placement aléatoire initiale et les déplacés à ces endroits pour atteindre une couverture maximale. Ces algorithmes sont applicables que pour les réseaux de capteurs mobiles. Des recherches ont également été menées dans les réseaux de capteurs mixtes, où certains des nœuds sont mobiles et certains sont statiques. Des approches sont également proposées pour détecter les lacunes de couverture après le déploiement initial et essayer de les couvrir par des capteurs mobiles. Il convient de noter qu'une stratégie de déploiement optimal ne doit pas seulement se traduire par une configuration qui offrirait une couverture suffisante, mais aussi satisfaire certaines contraintes telles que la connectivité des nœuds et du réseau [26].

2.3.1.1 Algorithme imprécis de détections(IDA)

Dhilon et al. [28] ont proposé l'algorithme de couverture IDA (Imprecise Detections Algorithm) qui assure que chaque point de la grille est recouvert d'un niveau de confiance minimum, en déployant un nombre minimal de capteurs qui assure la transmission des données. Le modèle attribue deux valeurs de probabilité p_{ij} et p_{ji} pour chaque paire de points de la grille (i, j) , où p_{ij} est la probabilité qu'un point j de grille est détecté par un capteur i et p_{ji} est la probabilité qu'un point i de la grille est détectée par un capteur j . En absence d'obstacle, ces valeurs sont symétriques : $p_{ij} = p_{ji}$. De là, une matrice de probabilité M est générée où $m_{ij} = (1 - p_{ij})$. Les obstacles sont modélisés comme des objets statiques et la valeur du p_{ij} est mis à zéro si un obstacle apparaît dans la ligne visée entre deux points de la grille (i, j) (comme illustré dans figure 2.1).

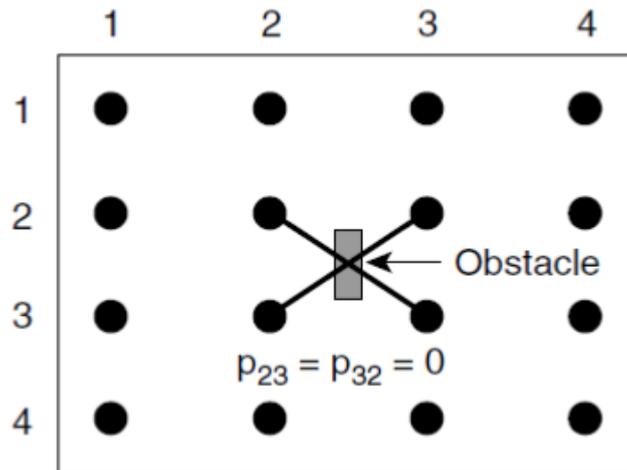


FIGURE 2.1 – Algorithme IDA

L'algorithme tel qu'il est décrit par Dhilon et al. [28] prend trois entrées : M, M^*, M_{\min} , où (1) M est la matrice de probabilité du coup manqué, comme mentionné ci-dessus, (2) $M^* = (M_1, M_2; \dots; M_n)$; telle que M_i est la probabilité qu'un point i de la grille n'est pas collectivement couvert par l'ensemble des capteurs et (3) $M_{\min} = 1 - T$, qui est la valeur maximale de la probabilité autorisé pour tout point manqué de la grille.

L'algorithme est itératif et utilise une heuristique gloutonne pour déterminer le meilleur emplacement d'un capteur. Elle se termine lorsque l'une des limites supérieure prédéfinie sur le nombre de capteurs est atteinte ou une couverture suffisante des points de la grille est réalisée.

2.3.1.2 Algorithme du champ potentiel (PFA)

Contrairement aux réseaux de capteurs statiques, les nœuds de réseaux de capteurs mobiles sont capables de se déplacer dans le champ de détection. De tels réseaux sont capables d'auto-déploiement à partir d'une configuration initiale. Les nœuds sont répartis de telle sorte à maximiser la couverture dans le champ de détection ; tout en maintenant la connectivité du réseau. En 1986 [30] une approche de déploiement du champ potentiel utilisant des robots mobiles autonomes a été proposée afin de maximiser la couverture de zone [26, 29]. Poduri et Sukhatme [26] augmentent le régime tel que chaque nœud a au moins k voisins, dans ce qui suit, nous décrivons le concept de l'algorithme du champ potentiel :

Le concept de base du champ potentiel est que chaque nœud est soumis à une force $F(\text{vecteur})^2$, qui est le gradient du champ potentiel scalaire U et $F = -\nabla U$. Chaque nœud est soumis à deux types de forces : (1) f_{cover} , ce qui provoque le repoussement mutuelle des nœuds est accroître leur couverture et (2) F_{degree} , rend les nœuds attirer l'un vers l'autre quand ils sont sur le point d'être déconnecté. Les forces sont modélisés comme étant inversement proportionnelle au carré de la distance entre une paire de nœuds en respectant les deux conditions limites suivantes :

1. $\|f_{\text{cover}}\|$ tend vers l'infini lorsque la distance entre deux nœuds est proche de zéro pour éviter la collision.
2. $\|F_{\text{degree}}\|$ tend vers l'infini lorsque la distance entre les voisins critiques s'approche du rayon de communication R_c .

En termes mathématiques, si $\|X_i - X_j\| = \Delta x_{ij}$ est la distance euclidienne entre deux nœuds i et j , puis $F_{\text{cover}}(i, j)$ et $F_{\text{degree}}(i, j)$ peuvent être exprimés de la manière suivante :

$$F_{\text{cover}}(i, j) = \frac{-k_{\text{cover}}}{\Delta x_{ij}^2} \left(\frac{x_i - x_j}{\Delta x_{ij}} \right) \quad (2.3)$$

$$F_{\text{degree}}(i, j) = \begin{cases} \frac{-k_{\text{degree}}}{(\Delta x_{ij} - R_c)^2} \left(\frac{x_i - x_j}{\Delta x_{ij}} \right) & \text{pour la connexion critique} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Dans la configuration initiale tous les nœuds sont accumulés dans un seul endroit et chaque nœud a plus de K voisins, en supposant que le nombre total des nœuds est $\geq K$. Puis, ils commencent à se repousser l'un de l'autre à l'aide de F_{cover} jusqu'à ce qu'il y seulement K voisins à gauche, à un point que les connexions atteignent un niveau critique et aucun de ces liens ne doivent être rompus à un moment ultérieur pour assurer la K connectivité.

Chaque nœud continue de repousser tous ses voisins à l'aide F_{cover} , mais comme la distance entre le nœud et ses voisins critiques augmente, $\|F_{cover}\|$ diminue et $\|F_{degre}\|$ augmente. Enfin, à une certaine distance ηR_c , où $0 < \eta < 1$, $\|F_{cover} + F_{degre}\|$ est égale à 0, chaque nœud et ses voisins atteignent un équilibre et le champ de détection devient uniformément couvert. Enfin, si un nouveau nœud rejoint le réseau ou un nœud existant cesse de fonctionner, les nœuds devront être reconfigurés pour satisfaire les critères d'équilibre.

2.3.1.3 Algorithme de force virtuel (VFA)

Similaire à l'approche du champ potentiel comme décrit par Poduri et Sukhatme [26], un algorithme de déploiement de capteurs basé sur les forces virtuels a été proposé [31, 32] pour augmenter la couverture après un déploiement initial aléatoire. La modification des emplacements des capteurs est utile pour garantir une couverture efficace.

Un capteur est soumis à trois types de force, qui sont de nature attractive ou répulsive. Les obstacles exercent des forces répulsives (F_{iR}), les zones de couverture préférentiel (zones sensibles, où un haut degré de couverture est requise) exercent des forces attractives (F_{iA}) et d'autres capteurs exercent des forces attractives ou répulsives (F_{ij}), en fonction de la distance et de l'orientation.

Une distance limite d_{th} est définie entre deux capteurs pour contrôler à quel point ils peuvent se rapprocher les uns des autres. De même, une couverture limite c_{th} est définie pour tous les points de la grille de telle sorte que la probabilité d'une cible détectée est supérieure à cette valeur. Le modèle de couverture tel qu'il est décrit dans cet algorithme est donné par l'équation 2.4.

La force résultante sur un capteur s_i est la somme vectorielle de toutes les trois forces :

$$F_i = \sum_{j=1, j \neq i}^k F_{ij} + F_{iR} + F_{iA} \quad (2.4)$$

Le terme F_{ij} peut être exprimé en coordonnées polaires avec l'ampleur et l'orientation :

$$F_{ij} = \begin{cases} (w_A(d_{ij} - d_{th}), \alpha_{ij}) & \text{si } d_{ij} > d_{th} \\ 0 & \text{si } d_{ij} = d_{th} \\ (w_R/d_{ij}, \alpha_{ij} + \pi) & \text{sinon} \end{cases}$$

Où d_{ij} est la distance entre les capteurs s_i et s_j , α_{ij} est l'orientation du segment de ligne de s_i à s_j , w_A et w_R sont des mesures de forces attractives et répulsives, respectivement.

L'algorithme VFA est un système centralisé, il est exécuté par un cluster-head et les nœuds sont placés au hasard dans le champ de détection. Pour tous les points de la grille, l'algorithme calcule la couverture totale, les forces virtuelles exercées sur un capteur s_i par tous les autres capteurs, les obstacles et la zone de couverture préférentiel. Ensuite, en fonction des forces nettes, de nouveaux emplacements sont calculés par le cluster-head et envoyés aux nœuds de capteurs, qui effectuent un mouvement ponctuel pour les positions désignées.

Pour une grille $n \times m$ avec un nombre total de k -capteurs déployé, la complexité du calcul de l'algorithme VFA est $O(nmk)$. L'efficacité de l'algorithme dépend des valeurs des quantités w_A et w_R . Ces principes avantages sont : le temps de calcul et le temps de repositionnement des capteurs sont négligeable. Cependant, l'algorithme ne fournit pas un plan de route pour repositionner les capteurs et éviter la collision.

2.3.1.4 Algorithme de distribution et d'auto-propagation (DSSA)

Le long des lignes du champ potentiel et des approches fondées sur des forces virtuelles, un algorithme de distribution et d'auto-propagation (DSSA) a été proposé [33] pour les réseaux de capteurs mobiles qui optimisent la couverture et maintient l'uniformité de la distribution des nœuds.

Ils définissent la couverture comme le rapport de l'union des zones couvertes de chaque nœud de la superficie totale de la zone de détection et d'uniformiser les distances moyenne des écarts-types entre-nœud. Dans les réseaux distribués de manière uniforme, la distances entre-nœud sont presque les mêmes donc la consommation d'énergie est uniforme. DSSA suppose que le déploiement initial est aléatoire et chaque nœud connaît sa position, semblable à VFA, il utilise la notion de force électrique qui dépend de la distance de séparation entre-nœud et la densité de courant locale (μ_{curr}).

Au début de l'algorithme, la densité initiale pour chaque nœud est égale au nombre de ses voisins. Il définit la notion de densité attendue comme le nombre moyen de nœuds nécessaires pour couvrir toute la zone lorsque les nœuds sont déployés de manière uniforme.

Elle est donnée par $U(R_c) = (N\pi R_c^2)/A$, où N est le nombre de capteurs et R_c est la portée de communication. DSSA exécute par étapes et les modèles de force sur le $i^{ème}$ nœud exercer par un $j^{ème}$ nœud pour un temps n comme suit :

$$f_n^{i,j} = \frac{\mu_{curr}}{\mu^2(R_c)} (R_c - |p_n^i - p_n^j|)(p_n^i - p_n^j)/(|p_n^i - p_n^j|) \quad (2.5)$$

Ou p_n^i désigne l'emplacement du $i^{ème}$ nœud pour un temps n . Selon les forces nettes voisines, un nœud peut décider de son prochain emplacement. L'algorithme s'installe lorsqu'un nœud se

déplace d'une distance infiniment petite pendant une période de temps ou lorsqu'il se déplace d'avant en arrière entre les deux mêmes endroits.

2.3.1.5 Protocol d'appel d'offre (BIDP)

Wang et al.[35] décrivent un tel protocole, appelé protocole d'appel d'offre, pour les réseaux de capteurs mixtes qui utilise des capteurs statiques et mobiles, tout en assurant une couverture suffisante. Ils réduisent le problème à l'ensemble NP-difficile et fournissent des heuristiques pour résoudre la proximité optimale.

Au départ, un mélange de nœuds fixes et mobiles sont déployés au hasard dans le champ de détection. Ensuite, les capteurs statiques calculent leurs polygones de Voronoï et trouvent la couverture des trous et également soumissionnent pour les capteurs mobiles pour accéder à leurs emplacements. Si un trou est détecté, un capteur statique choisit l'emplacement Voronoï le plus éloigné du sommet pour placer le capteur mobile ciblé et calcule l'offre tel que $\pi(\mathbf{d} - R_s)^2$, où \mathbf{d} est la distance entre le capteur Voronoï le plus éloigné du sommet et R_s est la zone de détection (voir Fig. 2.2(b)). Un capteur statique trouve alors un capteur mobile le plus proche dont le prix de base est inférieur à son offre (chaque capteur mobile à un prix de base associé qui est initialisé à zéro) et envoie un message d'appel d'offres pour ce capteur mobile. Le capteur mobile reçoit toutes les offres de ses capteurs statiques voisins et choisit l'offre la plus élevée et se déplace pour la couverture de ce trou. L'offre acceptée devient le nouveau prix de base du capteur mobile. Cette approche garantit qu'un capteur mobile ne se déplace pas pour la couverture d'un trou en créant un autres plus grand dans son lieu d'origine. Les

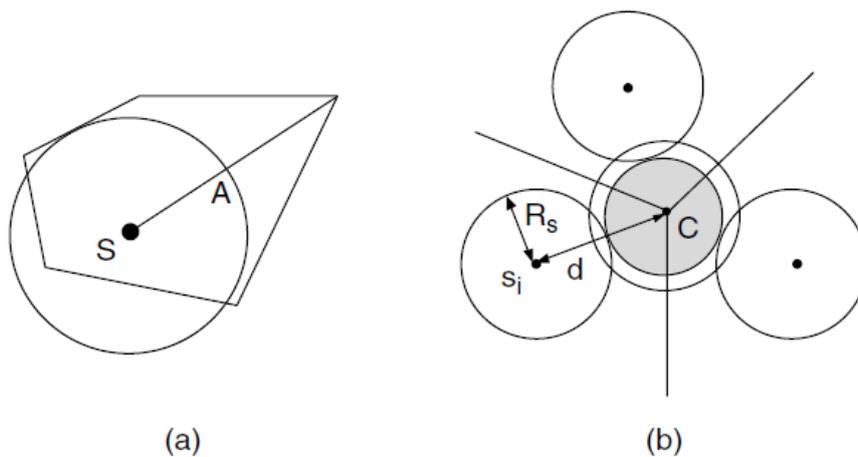


FIGURE 2.2 – (a)Polygone de Voronoï.(b)Offre estimée par un capteur s_i la surface du cercle ombragée avec le centre C.

auteurs intègrent également un algorithme d'auto-détection pour s'assurer qu'il n'y a pas deux capteurs mobiles qui se déplacent pour couvrir le même trou. Elles s'appliquent également au

régime d'ajustement de mouvement pour pousser les capteurs éloignés les uns des autres si leur mouvement peut garantir une couverture plus large.

2.3.1.6 Algorithme de programmation linéaire (ILPA)

Chakrabarty et al. [36] décrivent le modèle du problème d'optimisation de la couverture par programmation linéaire (ILP) et représentent le champ de détection en tant que grille à deux ou à trois dimensions. Étant donné une variété de capteurs avec des zones et des coûts différents, cet algorithme offre des stratégies pour minimiser le coût, calcule les bornes de codage de théorie sur le nombre de capteurs et présente les méthodes actuelles de leur placement avec une couverture souhaitée. Leur méthode de maximiser la couverture dans la zone de détection est différente dans le sens où il détermine une stratégie de déploiement, de telle sorte que chaque point de la grille est recouvert d'un sous-ensemble unique de capteurs. De cette façon, l'ensemble des capteurs déclare une cible à un moment donné et identifie son emplacement dans la grille.

2.3.1.7 Algorithme de déploiement de capteur au courant de l'incertitude(UADA)

Dans la plupart des algorithmes de déploiement des capteurs discutés jusqu'ici, leurs positions optimales sont déterminées pour maximiser la couverture. Cependant, il y a une incertitude inhérente dans leurs emplacements lorsque ils sont dispersés, éparpillés ou parachutés. Ainsi, pour chaque point dans le champ de détection il y a seulement une certaine probabilité qu'un capteur étant situé à ce point. Zou et Chakrabarty [37] présentent deux algorithmes de placement efficace de capteurs lorsque leurs emplacements exacts ne sont pas connus.

Les emplacements des capteurs sont modélisés comme des variables aléatoires suivant la distribution gaussienne. Soit l'emplacement du capteur (x, y) considérées comme des valeurs moyennes et σ_x, σ_y comme des déviations standards de la dimension x et y , respectivement. En supposant que ces écarts sont indépendants et rejoigne la distribution $P_{xy}(x', y')$; l'emplacement réel d'un capteur est calculé. Ensuite, l'incertitude sur l'emplacement du capteur est modélisé par une probabilité conditionnelle c_{ij}^* , pour qu'un point de la grille (i, j) peut être détecté par un capteur qui est censé être déployé à (x, y) . Par conséquent, la probabilité de manqué un point (i, j) dans la grille grâce à un capteur à (x, y) est calculé comme $m_{ij} = 1 - c_{ij}^*(x, y)$. De là, la probabilité de l'ensemble de point (i, j) manqué dans la grille due à un ensemble de capteurs L_s déjà déployées est donnée par $m_{ij} = \prod_{(x,y) \in L_s} 1 - c_{ij}^*(x, y)$.

L'algorithme détermine ensuite l'emplacement de l'un des capteurs dans un temps donné. Il découvre tous les emplacements possibles qui sont disponibles sur la grille à côté du capteur à déployer et calcule la probabilité globale des trous $M(x, y)$, grâce à des capteurs déjà déployées et ce capteur, en supposant qu'il sera placé à (x, y) : $m(x, y) = \sum_{(i,j) \in \text{Grille}} m_{ij}(x, y)m_{ij}$. Basé sur la valeur $m(x, y)$, le capteur de courant peut être placé au point de grille (i, j) avec une

probabilité globale maximale des points de la grille non couvert (pire cas de couverture) ou la probabilité minimale globale des points de la grille non couvert (meilleur cas de couverture). Une fois le meilleur emplacement est trouvé, les probabilités des points de la grille non couvert sont mis à jour et le processus continue jusqu'à ce que chaque point de la grille soit recouvert d'un niveau de confiance minimum. La complexité de la première phase de l'algorithme où il calcule les probabilités conditionnelles et les probabilités des points de la grille non couvert est $O((mn)^2)$, pour une grille $m \times n$. La complexité du calcul de la seconde phase, où l'algorithme déploie les capteurs est $O(mn)$.

2.3.1.8 Comparaison des algorithmes de déploiement

Les différentes stratégies de déploiement de capteurs décrites auparavant, n'ont pas les mêmes hypothèses et objectifs en fonction des besoins des applications sous-jacentes et de la nature du réseau de capteurs. Certaines de ces stratégies sont applicables aux réseaux de capteurs mobiles, tandis que d'autres ne sont pas applicables qu'aux réseaux de capteurs statiques. Puis, un couple d'algorithme joue un rôle important dans les scénarios ayant un mélange de nœuds statiques et mobiles. Par conséquent, les algorithmes varient en fonction de leurs applicabilités, de leurs complexités et de plusieurs autres facteurs. Dans ce qui suit, un tableau comparatif sur les stratégies basées sur le déploiement de capteur est réalisé 2.1 :

Algorithme	Réseau et objectifs	Avantages	Inconvénients	Performance
IDA [28]	Statique ; minimiser le nombre de capteurs et le trafic de communication.	Niveau de confiance minimum pour chaque grille, permet la modélisation des obstacles et des zones préférentielles.	Une parfaite connaissance du terrain et les détections de capteurs supposées être indépendant.	Surclasse le déploiement aléatoire en cas d'obstacle et de couverture préférentiel ; $O(n^2)$ complexité en temps, où n est le nombre de points de la grille.

Algorithme	Réseau et objectifs	Avantages	Inconvénients	Performance
PFA [26, 30]	Mobile ; nœuds mobiles redéployer à partir d'une configuration initiale afin de maximiser la couverture tout en conservant au moins k-connectivité.	Une bonne couverture sans cartes mondiales ; ne nécessite pas un contrôle centralisé, la localisation, d'où évolutive.	Calcul coûteux et suppose que chaque nœud peut détecter le nombre exact et la portée de ses voisins.	Plus performant que le déploiement aléatoire mais pauvre en performances que les réseaux de tuiles (réseaux où les nœuds sont déployés dans les modèles de tuiles, par exemple, triangulaires).
VFA [26, 30]	mobile ; nœuds mobiles redéployés à partir d'un placement aléatoire initial pour améliorer la couverture.	Un calcul de temps et de détermination de l'emplacement du capteur, permet la modélisation des obstacles et des zones préférentielles.	Capacité de calcul centralisé et supplémentaire du cluster-head ; aucune route plane de repositionnement de nœuds ; l'efficacité dépend des paramètres de force ; système de coordonnées discret.	Plus performant que le placement aléatoire. $O(nmk)$ complexité de temps pour une grille $N \times M$ de k capteurs déployés.

Algorithme	Réseau et objectifs	Avantages	Inconvénients	Performance
DSSA [33]	Mobiles ; nœuds propagés d'un déploiement aléatoire initial afin de maximiser la couverture et maintenir l'uniformité.	Algorithme d'auto-déploiement distribué.	Chaque nœud doit connaître sa propre situation ; les obstacles et les zones de couverture préférentiels ne sont pas modélisés.	forme la base d'une technique d'optimisation pour les problèmes combinatoires ; en termes d'uniformité ; le temps de déploiement, et la distance moyenne parcourue par les nœuds pour atteindre leur emplacement définitif.
BIDP [35]	Mixte ; réduire les lacunes de couverture et minimiser les coûts en déplaçant les nœuds mobiles.	Protocole distribué ; assure l'équilibre des coûts en utilisant une combinaison de nœuds fixes et mobiles	Pas de modélisation d'obstacles ; la performance dépend du rapport des capteurs mobiles à des capteurs statiques.	Augmentation de la couverture avec le pourcentage des capteurs mobiles mais la couverture existe en double et la distance moyenne de déplacement des capteurs augmente avec elle.

Algorithme	Réseau et objectifs	Avantages	Inconvénients	Performance
ILPA [36]	Statique ; assurer une couverture maximale de la grille pour la surveillance et la détection de la cible, tout en minimisant le coût des capteurs.	Les cibles peuvent être unique dans le sous-ensemble de capteurs qui les détectent.	Grande complexité computationnelle rend impossible le déploiement à grande échelle, qu'il s'appuie sur de parfait modèle de détection binaire.	Calcul coûteux.
UADA [37]	Statique ; déterminer le nombre minimal de capteurs et leur emplacement sous la contrainte de détection imprécise et les propriétés du terrain	Chaque point de la grille est recouvert d'un niveau de confiance minimum ; les modèles de capteurs d'endroits sont comme des variables aléatoires.	Détections de capteurs sont supposés être indépendants, coûteux en calcul	Complexité du temps de la première phase de l'algorithme est $O(mn)^2$ et la deuxième phase est $O(mn)$, pour une grille $m \times n$

TABLE 2.1 – Tableau comparatif des stratégies de déploiement de capteurs.

2.3.2 Couverture basée sur les chemins de l'exposition

L'utilisation des voies d'exposition est essentiellement un problème d'optimisation combinatoire. Du points de vue optimisation, ils existent deux types dans la formulation du problème de couverture : le pire et le meilleur cas de couverture.

Dans le pire cas de couverture, généralement le problème est abordé en essayant de trouver un chemin à travers la zone de détection, de sorte qu'un objet se déplaçant le long de ce chemin aura le moins de nœuds observable. Par conséquent, la probabilité de détecter l'objet en mouvement serait minimale. Trouver un tel chemin est important, si on inclut la possibilité

qu'un utilisateur peut modifier les emplacements des nœuds ou ajouter de nouveaux nœuds pour augmenter la couverture et donc l'observabilité. Deux méthodes d'aborder le problème du pire cas de couverture sont : le chemin d'une exposition minimale [17] et le chemin d'une rupture maximale [18, 19].

Dans le meilleur cas de couverture, le but est de trouver un chemin qui a le plus d'observabilité, donc un objet se déplaçant le long de ce chemin sera plus probable pour être détecté par les nœuds. Un exemple de ce type est un déplacement d'un robot autonome à énergie solaire dans un réseau de capteurs de détection de lumière, de manière à accumuler le plus de lumière dans un certain délai en utilisant le meilleur chemin de la couverture. Deux approches pour résoudre le problème du meilleur cas de couverture sont : le chemin d'exposition maximale [20] et le chemin du support maximal [19].

Dans les paragraphes qui suivent, nous décrirons plusieurs méthodes pour calculer le pire et le meilleur cas de couverture et les algorithmes qui utilisent le concept de l'exposition pour obtenir des résultats analytiques.

2.3.2.1 Chemin d'une exposition minimale : le pire cas de couverture

L'exposition est directement liée au problème de la couverture de zone dans les réseaux de capteurs. C'est une mesure de la façon dont un champ de détection est recouvert de capteurs. Elle peut être définie comme la capacité moyenne attendue d'observer une cible en mouvement dans le champ de détection. La voie d'exposition minimale fournit des informations précieuses sur le pire cas de couverture dans les réseaux de capteurs. Elle peut être définie formellement comme suit [21, 20] :

Définition : L'exposition d'un objet en mouvement dans un champ de détection pendant l'intervalle de temps $[t_1, t_2]$ le long d'un chemin $p(t)$ est définie comme l'intégrale :

$$E(p(t), t_1, t_2) = \int_{t_2}^{t_1} I(F, p(t)) \left| \frac{dp(t)}{dt} \right| dt \quad (2.6)$$

Où la fonction de détection de $I(F, p(t))$ est une mesure de la sensibilité du capteur le plus proche ou par tous les capteurs dans le champ de détection dans un point sur le chemin.

Dans le premier cas, on parle de l'intensité du champ du capteur le plus proche, définie comme $I_c(F, P(t)) = S(s_{\min}, P)$ où la sensibilité S est donnée par l'équation :

$$S(s_i, P) = \frac{\lambda}{[d(s_i, P)]^\gamma} \quad (2.7)$$

Où λ est un paramètre positif dépendant du capteur et $d(s_i, P)$ est la distance euclidienne entre le capteur s_i et le point P . Typiquement, la valeur de γ est en fonction des paramètres

environnementaux et varie entre 2 et 5 et s_{\min} est le capteur le plus proche du point P.

Dans ce dernier cas, on parle de l'intensité du champ de tous les capteurs, définie comme : $I_A(F, P(t)) = \sum_1^n S(s_i, P)$. Où les n capteurs actifs, s_1, s_2, \dots, s_n , contribuent d'une certaine valeur à la sensibilité au point P en fonction de leur distance par rapport à ce dernier. Dans l'équation 2.6, la quantité $|dp(t)/dt|$ est un élément d'arc de la trajectoire. Si le chemin est défini en coordonnées paramétriques comme $p(t) = (x(t), y(t))$, alors

$$|dp(t)/dt| = \sqrt{(dxp(t)/dt)^2 + (dyp(t)/dt)^2} \quad (2.8)$$

Cette définition de l'exposition telle qu'elle est donnée par l'équation 2.6, est une valeur dépendante du chemin. Etant donné deux extrémités A et B dans le champ de détection, il existe des chemins différents entre eux sont susceptibles d'avoir des valeurs d'exposition différentes.

Le problème de la trajectoire d'exposition minimale est de trouver un chemin $p(t)$ dans le champ de détection de telle sorte que la valeur de l'intégrale $E(p(t), t_1, t_2)$ est minimale.

2.3.2.2 Chemin d'exposition maximal : le meilleur cas de couverture

La notion du parcours de l'exposition maximal en le rapportant à la plus haute observabilité dans un champ de détection. Ensuite, nous allons expliquer plus en détail le concept et énoncer quelques méthodes pour calculer un tel chemin. Un trajet d'exposition maximal entre deux points quelconques A et B dans une zone de détection est un chemin suivant lequel l'exposition est totale, telle qu'elle est définie par l'intégrale de l'équation 2.6 qui est maximale. Il peut être interprété comme un chemin ayant la meilleure couverture. Il est équivalent à trouver le plus long chemin dans un graphe non orienté, pondéré, qui est connu pour être NP-difficile. Cependant, il existe plusieurs méthodes heuristiques pour avoir des solutions quasi-optimales sous les contraintes de la vitesse de l'objet, la longueur du trajet, la valeur d'exposition et le temps requis pour la traversée. Compte tenu de ces contraintes, tout chemin valide qui peut atteindre la destination avant la date limite est contenue dans une ellipse ; Ceci réduit considérablement l'espace de recherche pour trouver le chemin d'une exposition optimal[20]. Chacune des heuristiques sont décrites brièvement comme suit :

1. **Heuristique du chemin aléatoire** : est simple pour calculer approximativement la voie d'exposition maximale. Dans cette méthode, un chemin aléatoire est créé conformément à la règle selon laquelle un nœud sur le chemin le plus court à partir de la source A à destination B est sélectionné à un certains moments et un nœud aléatoire est sélectionné à d'autres moments. Les nœuds sur le chemin le plus court sont choisis en raison de la

contrainte de temps, et les nœuds aléatoires sont sélectionnés pour recueillir plus d'exposition. Cette approche ne dépend pas de la topologie du réseau et le calcul est peu coûteux.

2. **Heuristique du plus court chemin** : dans cette approche, d'abord un plus court chemin est calculé entre les deux extrémités A et B , en supposant que certaines connaissances topographiques sont disponibles. Ensuite, pour obtenir une exposition maximale, un objet doit se déplacer à la vitesse maximale sur ce chemin et s'arrêter à un point avec l'exposition la plus élevée. Toutefois, il pourrait ne pas donner une bonne approximation car aucun autre chemin qui pourrait avoir plus d'exposition est autorisé à être exploré.
3. **Heuristique du meilleur point** : cette heuristique superpose une grille sur l'ellipse puis trouve le chemin le plus court vers chaque point à partir de A et B . Suivant l'exposition totale des deux voies ayant un point commun dans la grille est calculé. La qualité de la trajectoire optimale dépend de la granularité de la grille, cette approche est coûteuse en ressources informatiques.
4. **Heuristique ajusté du meilleur point** : cette méthode améliore l'heuristique du meilleur point en considérant les parcours qui se composent de multiples plus courts chemins. L'exécution d'un ou plusieurs des ajustements de trajectoire telle que le déplacement, l'ajout ou la suppression d'un nœud sur le chemin le plus court de manière itérative, la solution optimale peut être trouvée.

2.3.2.3 Chemin de rupture maximal : le pire cas de couverture

Il existe plusieurs méthodes pour trouver une voie d'exposition minimale dans un champ de détection sous un seul capteur ainsi que des scénarios multi-capteurs. La recherche de cette dernière est équivalente à trouver une voie de pire cas de couverture qui fournit des informations précieuses sur la densité de déploiement des nœud dans le champ de détection. Un chemin de rupture maximal consiste à trouver les voies de pire cas de couverture à travers un champ de détection à partir de A et se terminant à B , de telle sorte que pour tout point P de la trajectoire, la distance entre P et le capteur le plus proche est au maximum [19]. Le diagramme de Voronoi [24] est un concept bien connu dans la géométrie algorithmique qui permet de trouver une voie de rupture maximale dans un champ de détection a été observée. En deux dimensions, le diagramme de Voronoï d'un ensemble de points discrets (appelés aussi les sites) divise le plan en un ensemble de polygones convexes, de telle sorte que tous les points à l'intérieur du polygone sont les plus proches d'un seul point. Dans la figure 2.3(a), 10 nœuds placés aléatoirement divisent la région rectangulaire délimité en 10 polygones convexes, appelés polygones de Voronoï. Deux nœuds s_i et s_j sont appelés voisins de Voronoï si leurs polygones partagent une arête commune. Les bords d'un polygone de Voronoï pour le nœud s_i est la bissectrice

perpendiculaire reliant s_i et ses voisins de Voronoï.

Par construction, les segments de ligne dans un diagramme de Voronoï maximisent la distance entre les sites les plus proches, le chemin de rupture maximale doit se situer le long des ces bords. Si ce n'est pas le cas, toute autre voie qui s'écarte des bords de Voronoï serait plus proche d'au moins un capteur, ce qui permet une plus grande exposition.

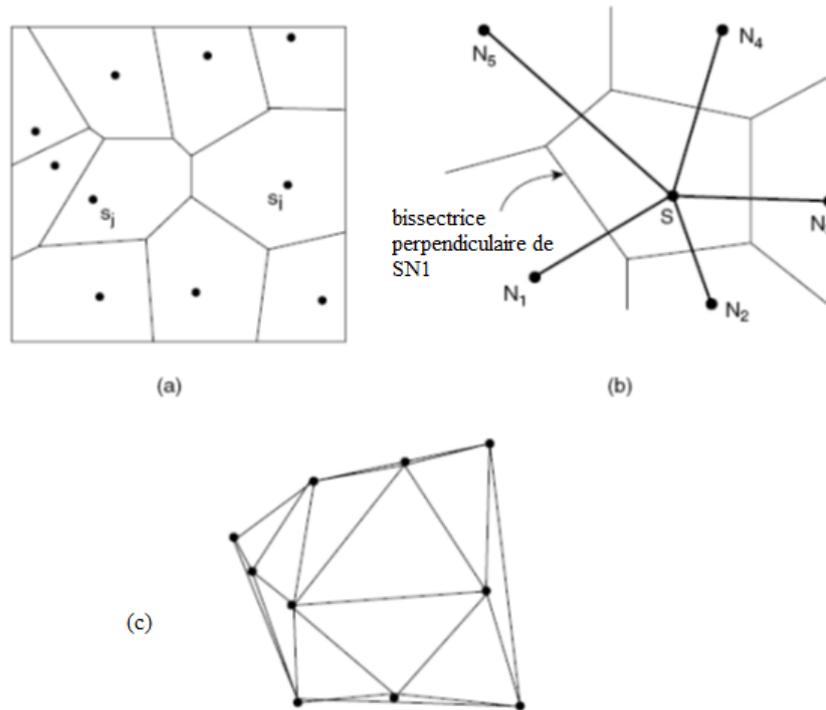


FIGURE 2.3 – (a)Diagramme de Voronoï de 10 nœuds déployés de manière aléatoire, (b)Polygone de Voronoï pour le nœud S , construit en traçant les bissectrices perpendiculaires de liaison S et ses voisins, (c)Triangulation de Delaunay pour le même ensemble de nœuds.

Ceci dit, le chemin de rupture maximal entre deux points A et B se situe le long des bords de Voronoï. Une approche basée sur la géolocalisation est utilisée pour déterminer la position des nœuds, et un diagramme de Voronoï sur la base de ces informations est construit, puis un graphe G pondéré, non orienté est formé par la création d'un nœud pour chaque sommet et un bord correspondant à chaque segment de ligne dans le diagramme de Voronoï, chacun se voit attribuer un poids égal à la distance minimale entre le capteur le plus proche. L'algorithme vérifie alors l'existence d'un chemin de A à B en utilisant la largeur d'abord (BFS¹), puis utilise la recherche binaire entre le plus petit et le plus grand poids des arêtes de G pour trouver le chemin de la rupture maximale. Il convient de noter que le chemin de rupture maximale n'est pas unique. Il peut être prouvé que la complexité dans le pire des cas de l'algorithme est donnée par $O(n^2 \log n)$ et pour les réseaux rares il est de $O(n \log n)$.

1. Breadth First Search

En outre, l'algorithme trouve un chemin de rupture maximal à un moment donné, l'exposition ne dépasse pas une valeur particulière qu'il tente de minimiser tout au long de l'intervalle de temps dans le réseau.

2.3.2.4 Chemin du support maximal : le meilleur cas de couverture

Un chemin du support maximal à travers un champ de détection à partir de A et se terminant à B est un chemin tel que, pour tout point P sur cette voie, la distance entre P et le capteur le plus proche est réduite au minimum. Ceci est similaire à la notion de voie d'exposition maximale. Toutefois, la différence réside dans le fait qu'un algorithme de trajet du support maximal trouve un chemin à un instant de temps donné, de telle sorte que l'exposition sur le chemin n'est pas inférieure à une valeur particulière qui doit être maximisée. En revanche, la voie du support maximale ne se concentre pas sur un moment particulier, mais plutôt, il considère tout le temps passé lors de la traversé d'un objet.

Un chemin du support maximal dans un champ de détection peut être trouvé par le remplacement du diagramme de Voronoï par son double et la triangulation de Delaunay comme le montre la figure 2.3(b), où les arêtes du graphe sous-jacent sont assignés des poids égaux à la longueur des segments de ligne correspondantes dans la triangulation de Delaunay. (La triangulation de Delaunay [24] est une triangulation des sommets du graphe de telle sorte que le cercle circonscrit de chaque triangle Delaunay ne contient pas d'autres sommets). Similaire à l'approche du chemin de la rupture maximal décrit précédemment, cet algorithme vérifie également l'existence d'un chemin à l'aide de la recherche largeur d'abord et applique la recherche binaire pour trouver le chemin du support maximal. La complexité du pire des cas et le cas moyen de cet algorithme sont $O(n^2 \log n)$ et $O(n \log n)$, respectivement.

Plusieurs méthodes pour calculer les pires et les meilleurs cas de méthodes de couverture exploitant le concept d'exposition pour détecter des cibles dans un champ de détection ont été décrites. Les voies d'exposition peuvent également être utilisées pour déterminer le nombre optimal de capteurs (densité de nœud critique) requis pour une couverture complète avec une très grande détectabilité de la cible [25]. Etant donné que la tâche de détection est fondamentalement probabiliste, le procédé de calcul de la densité critique tient compte à la fois de la nature et des caractéristiques du capteur et de la cible.

Le modèle d'exposition basée sur un chemin tel que décrit dans l'équation 2.6 et que la cible se déplace en ligne droite à vitesse constante loin du capteur à une distance d . Les valeurs typiques sont calculés pour les quantités $(R_s - R_u)$ et $(R_s + R_u)$, qui sont appelés comme rayon

d'influence complet (noté R_{ci}) et de rayon d'aucune influence (notée R_{ni}), respectivement. Il peut être prouvé que pour une exposition typique E_{th} , les valeurs de rayon d'influence complète et d'aucune influence sont donnés par les équations suivantes [25] :

$$E_{th} = \frac{\lambda}{vR_{ci}} \left(\frac{\delta}{\delta + R_{ci}} \right) \quad (2.9)$$

$$E_{th} = \frac{\lambda}{vR_{ni}} \tan^{-1} \left(\frac{\delta}{2R_{ni}} \right) \quad (2.10)$$

Pour couvrir une zone A avec le déploiement aléatoire, le nombre de nœuds requis est d'ordre de $O(A/R_{ni}^2)$.

2.3.3 Stratégies diverses

Les algorithmes garantissant une couverture optimale du champ de détection est notre préoccupation principale. Cependant, un réseau de capteurs doit être bien connecté, Les données captées par les nœuds peuvent être transmises par des voies de communication multi-sauts à d'autres nœuds et peut-être à une station de base où des décisions intelligentes peuvent être faites. Les techniques assurant la couverture, la connectivité dans un champ de détection, la réduction de la redondance et la pérennité du réseau se présentent comme suit :

2.3.3.1 Algorithme basé sur le sondage de l'environnement

Ye et al. [42], ont proposé un protocole distribué qui maintient la couverture de surface, nommé **PEAS**(**P**robing **E**nvironment **A**daptative **S**leeping). Il a été proposé pour les réseaux denses et asynchrones où les capteurs ne connaissent pas leurs positions et possèdent les mêmes rayons de captage et de communication. Le protocole PEAS étend la durée de fonctionnement du réseau en gardant, à l'état actif, seulement les nœuds nécessaires.

Description de l'algorithme PEAS

Dans PEAS chaque nœud de l'environnement peut être dans l'un des trois états : actif, sondage ou sommeil.

L'état sommeil

Initialement, après le déploiement du réseau, tous les nœuds sont dans le mode sommeil. La durée du sommeil suit une distribution exponentielle générée par la fonction de densité de Probabilité $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$. où λ est le taux de sondage du nœud et t désigne la durée du sommeil.

L'état sondage

Un nœud à l'état de sondage, commence à chercher un capteur actif se trouvant dans un rayon de sondage R_p . Cette recherche est effectuée en envoyant un message PROBE. Tous les capteurs, qui sont dans le rayon de sondage, répondent avec un message REPLAY. Si le nœud sondeur reçoit au moins une réponse, il retourne à l'état sommeil pour une durée de temps générée selon la même fonction de densité de probabilité. Il est possible que plus d'un voisin du nœud sondeur, soit actif. Pour réduire les collisions, chaque nœud actif utilise un délai d'attente aléatoire à la fin auquel, il envoie la réponse REPLAY.

L'état actif

Si un capteur n'a reçu aucun message REPLAY lors du sondage de son environnement, il se met à l'état actif jusqu'à l'épuisement de ses ressources énergétiques ou jusqu'à sa défaillance. La figure 2.4 illustre le diagramme de transition des états des nœuds.

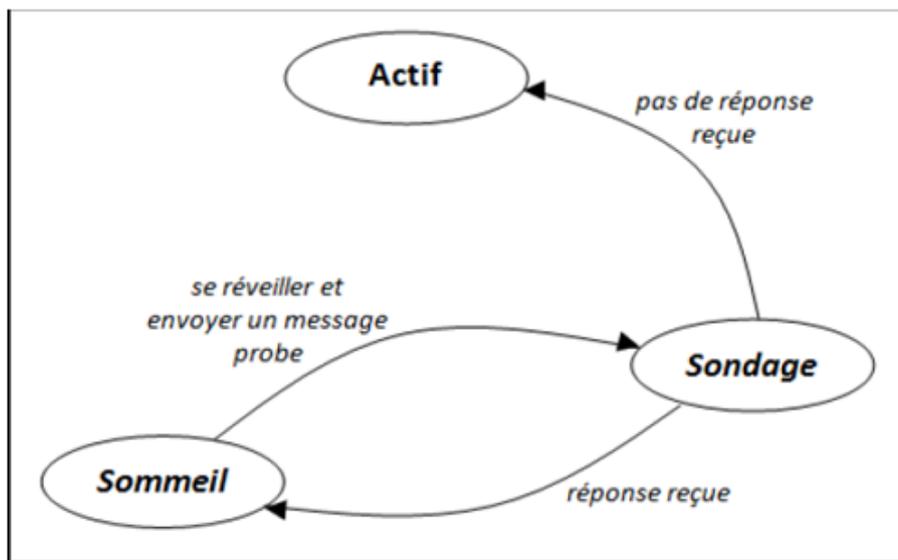


FIGURE 2.4 – Diagramme de transition d'état du protocole PEAS.

Critique de l'algorithme PEAS

Dans le protocole PEAS, tout nœud actif recevant un message doit répondre, ce qui engendre un coût de communication très élevé. Ce qui conduit à une consommation importante d'énergie, et donc une dégradation de la durée de vie.

L'inconvénient de ce protocole est qu'il n'assure pas une couverture totale, sauf si $R_p < \sqrt{5} * R_{cap}$, où R_p est le rayon de sondage et R_{cap} est le rayon de capture.

2.3.3.2 Algorithme OGDC (Open Geographic Density Control)

Misra et al. [38] ont proposé un algorithme localisé préservant la couverture et la connectivité nommé **OGDC** (pour **O**pen **G**eographic **D**ensity **C**ontrol). Il est basé sur la création de sous ensembles disjoints de capteurs gérés par un ensemble de cluster-heads.

Hypothèses de l'algorithme

Les auteurs supposent que :

- Le rayon de communication R_c est le double du rayon de captage d'un nœud de capteur.
- le rayon de captage et le rayon de communication d'un nœud capteur sont supposés être des "disques parfaits", ce qui signifie, si la zone de détection d'un nœud est " r ", le nœud peut détecter la cible, si elle est à une distance de ' r ' à partir du nœud.
- Chaque nœud connaît ses coordonnées géographiques.
- Les cluster-head sont des nœuds à une grande puissance énergétique, capacité de calcul et un rayon de communication plus large.

2.3.3.2.1 Présentation de l'algorithme

OGDC permet une utilisation du cluster-head qui traitera les emplacements des nœuds, et attribue à chaque capteur un numéro de série. Un seul ensemble de capteurs sera maintenue active à tout moment. Chaque ensemble de détection est choisi de telle sorte que l'activation de tous les nœuds de cet ensemble est suffisant pour maintenir la couverture de la zone de surveillance. Après la temporisation, les nœuds de l'ensemble actuel iront en état de veille et la prochaine série du capteur sera activé. De cette manière, l'obligation de couverture de toute la zone est remplie.

Étant donné que les ensembles sont formés par le cluster-head, cet algorithme peut être utilisé pour exécuter des déploiements de nœuds capteurs à grande échelle en utilisant plus d'un cluster-head et chaque cluster-head va tenter de maintenir la couverture des nœuds dans son environs. De cette manière, l'algorithme peut être exécuté à moindre coût.

2.3.3.2.2 Différents états d'un nœud capteur

Etat de renseignement

Après le déploiement des nœuds capteurs, Chacun de ces derniers commence sa vie à partir de l'état de renseignement. Dans cet état, l'unité de communication du nœud sera allumé et les unités de détection et de traitement sera arrêté. Les nœuds capteurs attendent jusqu'à ce qu'ils entendent le message "HELLO" du cluster-head. Après la réception de ce message, les nœuds capteurs choisissent leur cluster-head à lequel ils appartiendront. Une fois un cluster-head est

déterminé, il diffuse à tous ses voisins un message pour les informer qu'il ait été élu comme étant " un nouveau cluster-head". Pour les noeuds qui reçoivent plusieurs messages, la décision d'adhérence à un cluster repose sur la puissance du signal reçu à travers le cluster-head.

Etat actif

Dans cet état, le nœud capteur effectue les trois tâches suivantes : le traitement, la détection et la communication. Si le nœud est dans cet état, son unité de détection sera allumée et le travail réel du nœud démarre. L'unité de traitement du nœud de capteur analyse les données détectées afin de les envoyer au cluster-head ou bien les supprimé directement. La plupart de l'énergie du noeud est dépensé dans cet état seulement, car la tâche de détection est très couteuse.

Etat de veille

L'état de veille se réfère à l'état du nœud de capteur où le noeud passe en mode économie d'énergie maximal, c'est à dire, le nœud n'effectue pas les tâches de détection, de traitement ou de communication dans ce mode. Seul l'émetteur-récepteur du capteur sera maintenu à l'état ON, afin de répondre au message "HELLO" du cluster-head. Cet état est conçu afin de maximiser la durée de vie du nœud capteur.

Le diagramme de transition des états d'un nœud capteurs est donné par la Figure 2.5 :

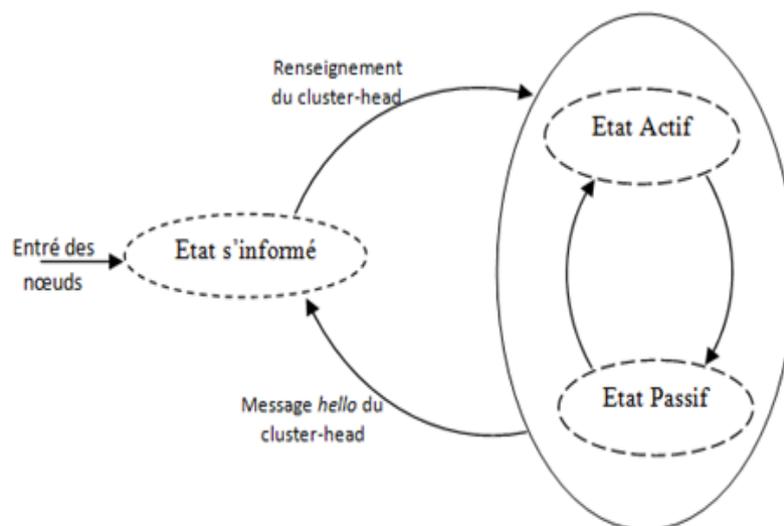


FIGURE 2.5 – Diagramme de transition des états des nœuds capteurs.

2.3.3.2.3 Description de l'algorithme

L'objectif principal de cet algorithme est de couvrir une zone spécifique en minimisant le nombre de nœuds actifs tout en gardant la connectivité du réseau. Après le déploiement aléatoire des nœuds dans une zone géographique, les nœuds capteurs entrent directement à l'état de renseignement. Le cluster-head commence la diffusion du message "HELLO" et démarre une minuterie pour attendre un temps " T_{wait} ". Après la réception du message "HELLO", les nœuds capteurs envoient leurs coordonnées de position au cluster-head, où ce dernier collecte toutes les informations de position de tous les nœuds et met à jour sa base de données. Après l'expiration du temps d'attente " T_{wait} ", le cluster-head exécute son algorithme.

L'algorithme utilise comme entrée la base de données (les coordonnées des nœuds) et génère en sortie des ensembles, chaque ensemble contient les identifiants d'un certain nombre de capteurs.

Une fois que les ensembles sont formés, le cluster-head envoie le numéro de série et le temps de travail " T_{work} " à tous les nœuds. Après que les nœuds reçoivent leurs informations (numéros de série, T_{work}), ils changent leur état de l'état de renseignement à l'état actif ou bien à l'état de veille, selon leur algorithme. Tous les nœuds dans l'état actif commencent leur activité de détection, et d'informer le cluster-head s'il y a une activité intéressante dans son voisinage. Chaque ensemble surveille sa région pendant une période de " T_{work} ".

Après l'épuisement du temps requis pour le travail " T_{work} ", l'ensemble des nœuds actifs passe en mode de veille et l'ensemble suivant s'active et surveille la région. De cette manière, la durée de vie du réseau peut être augmentée.

2.3.3.2.4 Algorithme du cluster-head

Cet algorithme se présente en trois étapes :

Etape 1 : Le cluster-head diffuse un message "HELLO" à tous les nœuds et attend la réponse de ces derniers contenant leur localisation géographique.

Etape 2 : En utilisant les coordonnées des nœuds, le cluster-head commence d'abord par trouver la paire de nœuds (qu'on note A et B), qui ont la plus petite distance euclidienne, dans le réseau. Comme ces deux nœuds sont les plus proches, ils garantissent la connectivité du réseau. Ensuite, trois ensembles (S_1, S_2, S) seront définis où l'ensemble S contient les nœuds qui seront activés en même temps afin de couvrir la zone d'intérêt.

Puis les deux nœuds A, B seront ajoutés à l'ensemble S . Tous les nœuds qui sont voisins de communication avec le nœud " A ", sont ajoutés à l'ensemble S_1 , sauf les nœuds qui sont dans sa zone de couverture. De la même manière on définit l'ensemble S_2 par l'ajout de tous les nœuds qui sont voisins de communication avec le nœud " B " et retiré les nœuds qui sont dans sa zone de couverture.

Etape 3 : Le cluster-head collectionne les informations capturé par les nœuds, et l'envoie par la suite à la station de base.

2.3.3.2.5 Algorithme exécuté par les nœuds

Au début, les nœuds capteur sont déployés aléatoirement et restent dans l'état de renseignement jusqu'à ce qu'ils reçoivent le message "HELLO" par le cluster-head. Après la réception de ce message les nœuds envoient leur coordonnée et numéro d'identification au cluster-head. Ensuite, les nœuds capteur attendent la réponse du cluster-head qui contient les trois parties suivantes : le numéro d'identificateur du nœud " i ", le nombre total des ensembles " n " et le temps de travail " T_{work} " de chaque capteur.

A partir de la première période, tous les nœuds de cet ensemble restent à l'état actif et exercent l'activité de détection pour un intervalle de temps de " T_{work} " et passent à l'état de sommeil. Tous les autres ensembles demeurent dans l'état de sommeil au cours de cet intervalle de temps. Après l'expiration du temps de travail " T_{work} ", la prochaine série passe de l'état de veille à l'état actif et continue l'activité de détection. Après l'achèvement des n ensembles, le premier ensemble de nœuds commence à surveiller à nouveau et le cycle se poursuit jusqu'à ce que les nœuds de nouveau entendent la retransmission de paquets HELLO du cluster-head.

Critiques de l'algorithme

Ce protocole utilise le principe d'inondation par des messages "HELLO", ce qui conduit à une consommation excessive d'énergie. Vu la faible bande passante des nœuds, des transmissions simultanées au cluster-heads peuvent provoquer des collisions et une perte de messages.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes méthodes et protocoles, qui couvrent de façon optimale un champ de détection tout en maintenant sa connectivité. Nous avons comparé plusieurs algorithmes de déploiement des nœuds statiques et mobiles ainsi que les réseaux de capteurs mixtes. Nous avons également constaté que les chemins d'exposition peuvent être considérés comme une mesure de qualité pour la détection d'une cible mobile dans un champ de détection. Les systèmes de planification des nœuds que nous avons décrits sous diverses stratégies assurent une pérennité du réseau et garantissent une dissipation uniforme de la batterie à travers le réseau qui implique une couverture optimale et une meilleure gestion des ressources.

Dans le chapitre suivant, nous allons décrire un algorithme de couverture minimale d'un périmètre d'une région que nous améliorerons par la suite pour la couverture d'une surface.

CHAPITRE 3

CONTRIBUTION À LA COUVERTURE D'UNE ZONE DANS UN RCSF HÉTÉROGÈNE

3.1 Introduction

En raison des contraintes de ressources énergétiques des nœuds capteurs, la plupart des réseaux de capteurs, en particulier ceux concernés par la couverture d'une zone, visent à minimiser le nombre de nœuds actifs tout en maintenant la couverture totale de la zone afin d'économiser la consommation d'énergie et d'étendre la durée de vie du réseau.

Dans ce chapitre, nous présenterons notre contribution qui consiste en une extension de l'algorithme proposé par Khedr et Osamy [43]. Ce dernier consiste à trouver le nombre minimum de capteurs qui assurent la couverture d'un périmètre d'une région.

3.2 Motivations

Le déploiement aléatoire des capteurs est largement utilisé dans les applications environnementales, militaires et autres. Vue la taille réduite des capteurs, la capacité de stockage, de traitement et principalement d'énergie sont très limitées. L'objectif des algorithmes de couverture, consiste à préserver la surveillance totale d'une zone d'intérêt en consommant le minimum d'énergie et ce afin d'augmenter la longévité du réseau.

Le déploiement dense des capteurs engendrent plusieurs problèmes, parmi lesquels on trouve la redondance; à tout moment il existe plusieurs capteurs qui couvrent une même portion de la zone de déploiement. L'ordonnancement d'activité est l'une des techniques

utilisées par les protocoles de couverture, il permet de réduire la redondance des capteurs. Ordonnancer l'activité dans un réseau de capteurs consiste à alterner les charges de façon à épuiser l'énergie des nœuds équitablement. Pendant qu'une partie participe à l'application, les autres sont dans un mode passif, économisant ainsi leur énergie.

Nous souhaitons donc ordonnancer l'activité des capteurs de façon à ce que l'ensemble des capteurs actifs soit capable de surveiller toute la zone.

3.3 Algorithme de référence

3.3.1 Enoncé du problème et définitions

Khedr et Osamy [43] envisagent un WSN dans lequel le périmètre d'un objet cible doit être surveillé. Ce dernier est entouré par des capteurs répartis de façon aléatoire. Chaque capteur peut seulement surveiller une partie du périmètre et peut communiquer uniquement avec ses voisins. L'algorithme tient à identifier un ensemble minimal de capteurs qui permet de surveiller l'ensemble du périmètre en économisant l'énergie.

Cet algorithme de couverture de périmètre peut être appliqué à n'importe quelle forme arbitraire, de telle manière que chaque capteur peut déterminer la partie de chevauchement de sa zone de détection avec le périmètre de la région d'intérêt Q , pour simplifier les calculs, la région d'intérêt est supposée être une région circulaire. Avant de décrire cet algorithme distribué, les auteurs ont commencé par donner quelques préliminaires, des notations et des hypothèses permettant ainsi de bien présenter leur travail.

3.3.1.1 Définitions

Définition 1

La zone de détection d'un capteur S_i (appelé zone de couverture ou bien zone de captage) est la zone dans laquelle, si un événement se produit, il sera détecté par le capteur. Elle est représentée par un disque de rayon R_c centré en S_i . L'ensemble des points couverts par le nœud S_i est formulé mathématiquement de la manière suivante :

$$Z(S_i) = \{(x, y) \in \Phi \mid \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} < R_c\} \quad (3.1)$$

Où :

(x_i, y_i) : les coordonnées du i^{eme} nœud.

Définition 5

La gamme couverte est définie comme la partie du périmètre de la région d'intérêt qui est couverte par la zone de détection d'un capteur. Elle est représentée en terme d'angle et identifiée par l'intervalle fermé [Angle de départ, Angle final].

Un capteur est en mesure de couvrir une partie du périmètre Q s'il est à une distance inférieure à $R + r$. $2 * \text{Theta}$ est l'angle couvert qui peut être calculé en utilisant l'équation suivante :

$$\text{Theta} = \arccos\left\{\frac{R^2 + d^2 - r^2}{2d * R}\right\} \quad (3.2)$$

Où r est le rayon de détection du capteur S_k et d est la distance entre le centre du nœud et celui de la région d'intérêt. Les angles de couverture de S_k peuvent être calculés en utilisant les équations suivantes :

$$\text{Startangle} = \arctan2\left(\frac{Y - \text{coordinate}(p1)}{X - \text{coordinate}(p1)}\right) \quad (3.3)$$

$$\text{Endangle} = \arctan2\left(\frac{Y - \text{coordinate}(p2)}{X - \text{coordinate}(p2)}\right) \quad (3.4)$$

La gamme de couverture peut être redéfinie comme la partie de la circonférence couverte de la région d'intérêt qui commence à partir de l'angle de départ (Startangle) du premier point d'intersection et se termine à l'angle final(Endangle) du second point d'intersection. Lorsque deux nœuds se chevauchent dans la zone de couverture, l'un d'eux est un voisin précédent et l'autre est un voisin suivant (les nœuds voisins suivants sont choisis dans le sens des aiguilles d'une montre). Le capteur S_j est un voisin précédent de S_i et S_i est un voisin suivant de S_j si : Angle de départ (S_j) < Angle de départ (S_i) < Angle final (S_j).

3.3.2 Hypothèses de l'algorithme

Cette approche repose sur les hypothèses suivantes concernant les capteurs :

1. **Déploiement** : tous les capteurs sont déployés d'une manière aléatoire dans la zone de surveillance à deux dimensions. Le rayon de communication de chaque capteur est fixe, par contre le rayon de couverture peut varier d'un capteur à un autre (c'est-à-dire les rayons de couverture sont hétérogènes).
2. **Capacité matérielle** : nous supposons que chaque capteur est équipé d'un dispositif de détection (pour détecter le phénomène), un dispositif de communication (pour communiquer avec les capteurs voisins) et une unité de traitement (pour traiter les données localement).
3. **Localisation** : la position de chaque capteur est connue dans un système de coordonnées global arbitraire, en utilisant un système de localisation. Pour simplifier, nous supposons

que chaque capteur connaît sa position en termes de coordonnées (x, y) . Les voisins d'un capteur particulier sont déterminés en fonction de sa zone de couverture.

4. **Nœuds fixes** : une fois que les capteurs sont déployés, ils sont supposés être statiques.
5. **Protocole de communication sous-jacente** : on suppose qu'il existe un protocole sous-jacent qui prend soin de toutes les informations nécessaires de communication au sein du réseau.

3.3.2.1 Principe de fonctionnement de l'algorithme ICPA

Le principe de cet algorithme nommé ICPA (Pour Identifying Coverage Perimeter Algorithm) [46] est de choisir le plus petit ensemble de capteurs qui assure la couverture totale du périmètre.

Lorsque un utilisateur lance une requête pour couvrir la circonférence d'une région d'intérêt Q , un capteur autour du centre se considère comme un coordinateur appelé **CNode** (un nœud sélectionné par l'utilisateur) et exécute les étapes suivantes pour estimer la couverture minimale du périmètre et déterminer C_{\min} de Q :

- **CNode** recueille les informations de tous les nœuds. Cette étape a une complexité de $O(n)$, n étant le nombre de capteurs.
- L'ensemble des capteurs qui chevauche avec la circonférence dénoté (C) , répondent au **CNode** avec leurs informations (identité, localisation et rayon de détection).
- A l'aide des informations reçues, **CNode** effectue les opérations suivantes :
 - Calculer les deux points communs entre la zone de détection de chaque capteur et la circonférence de Q ;
 - Calculer la partie d'angle de la circonférence de Q couverte par chaque capteur, à l'aide des deux points communs.
- **CNode** sélectionne le capteur $S_{\text{défaut}}$ qui couvre la plus grande circonférence de Q .
- **CNode** exécute l'algorithme pour déterminer l'ensemble minimal C_{\min} pour la couverture du périmètre.
- **CNode** diffuse C_{\min} représentant le périmètre de couverture minimale de Q .

Par conséquent, la complexité des messages globales de cette approche est en $O(n)$.

Algorithme. Trouvez l'ensemble minimal C_{\min} qui couvre le périmètre de Q

Algorithme :

Le coordinateur **CNode** exécute cet algorithme pour trouver l'ensemble de couverture minimale (C_{\min}) du périmètre Q .

1. **Initialement** : le coordinateur **CNode** dispose d'un ensemble C de capteurs qui se croisent avec la circonférence de Q ;
2. Angle actuel \leftarrow Angle final ($S_{\text{défaut}}$) ;
3. $C_{\min} \leftarrow S_{\text{défaut}}$;
4. **Tantque** Angle actuel < 360 **faire**
5. trouver $S_i/S_i \in C$ et possède un angle de départ $<$ Angle actuel et qui a un Angle final aussi loin que possible.
6. $C_{\min} \leftarrow C_{\min} \cup S_i$;
7. Angle actuel = Angle final (S_i) ;
8. **Fin Tantque**

3.4 Contribution

L'algorithme proposé par Khedr et Osamy [43] consiste à couvrir le périmètre d'une région. Nous allons présenter notre travail, réalisé sur cet algorithme qui constitue, à notre sens, une contribution intéressante en essayant de couvrir toute la surface d'une région en commençant par son périmètre.

Description de l'algorithme

L'objectif principal de cet algorithme est de couvrir une zone spécifique en minimisant le nombre de nœuds actifs tout en gardant la connexité du réseau. Après le déploiement aléatoire des nœuds dans une zone géographique, les nœuds capteurs transmettent directement leur coordonnée à la station de base. Cette dernière exécute l'algorithme pour déterminer les ensembles minimaux de capteurs où chaque ensemble est choisi de telle sorte que l'activation de tous ces nœuds est suffisante pour maintenir la couverture de la zone de surveillance durant un temps T_{work} . Après la temporisation, les nœuds de l'ensemble actuel iront en état de veille et le prochain ensemble de capteurs sera activé. De cette manière, la longévité du réseau est remplie.

Après la construction des ensembles de capteurs la station de base envoie aux capteurs un message contenant les ensembles auxquelles ils appartiennent et change, par la suite, leur état à l'état actif ou bien à l'état de veille, selon la temporisation.

Etat actif : dans cet état, le nœud capteur effectue les trois tâches suivantes : la détection et la communication. Si le nœud est dans cet état, son unité de détection sera allumée

et le travail réel du nœud démarre. La plupart de l'énergie du nœud est dépensé dans cet état seulement, car la tâche de détection est très coûteuse.

Etat de veille : l'état de veille se réfère à l'état du capteur où le nœud passe en mode économie d'énergie maximale où seul l'émetteur-récepteur du capteur sera maintenu à l'état actif. Cet état est conçu afin de maximiser la durée de vie des capteurs, par conséquent de tout le réseau.

Hypothèse : En plus des hypothèses citées auparavant, on suppose que la station de base se trouve au centre de la zone d'intérêt qui a un rayon R_B . Cette dernière a une puissance énergétique illimitée, capacité de calcul et un rayon de communication plus large.

3.4.1 Etapes de couverture d'une surface

Etape 1 :

Après avoir déployé les nœuds capteurs dans la zone d'intérêt, chaque capteur exécute l'algorithme ICPA (pour Identifying coverage perimeter algorithm) afin de déterminer le nombre minimum de capteur ($C_{p_{min}}$) pour couvrir le périmètre.

Etape 2 :

Dans cette deuxième étape nous allons procéder à la couverture de toute la zone, ceci en définissant un autre cercle de rayon inférieur au rayon de la zone d'intérêt.

Cette étape sera répétée jusqu'à ce que le rayon de la dernière itération sera inférieur ou égale au rayon R_B de la station de base. De cette manière on pourra calculer le nombre minimal C_{min} de capteurs qui assure la couverture de la surface.

Première approche :

Une fois que le périmètre est couvert, on cherche à déterminer le point le plus loin, par rapport au centre de la région, non couvert et qui se situe à l'intérieure de la zone d'intérêt, pour y parvenir, on doit trouver d'abord tous les points d'intersection des zones de couverture des nœuds appartenant à $C_{p_{min}}$, ensuite calculer la distance euclidienne maximale entre le centre de la zone d'intérêt et ces points d'intersections. Le rayon de la zone dans chaque itération s'écrit sous la forme suivante :

$$R(i) = \max d(x_j, y_j) - (r_{\min}/2) \quad (3.5)$$

Où :

(x_j, y_j) : les coordonnées d'intersections des zones de couvertures de deux nœuds voisins.

r_{\min} : le plus petit rayon de couverture des capteurs.

$d(x_j, y_j)$: représente la distance euclidienne entre le centre de la zone de coordonnées (x_c, y_c) et le point de coordonnées (x_j, y_j) .

$$d(x_j, y_j) = \sqrt{(x_j - x_c)^2 + (y_j - y_c)^2} \quad (3.6)$$

Procédure de recherche des points d'intersections

Pour trouver les points d'intersections des zones de couverture des nœuds appartenant à Cp_{\min} , nous allons procéder de la manière suivante :

Equation du premier cercle :

$$R_0^2 = (x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 \quad (3.7)$$

Equation du deuxième cercle :

$$R_1^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \quad (3.8)$$

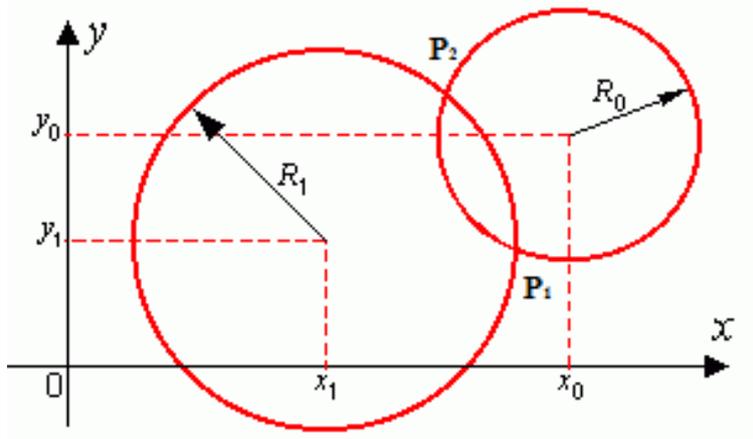


FIGURE 3.2 – Intersection de deux cercles.

En développant les équations précédentes on aura :

$$R_1^2 = x_1^2 + x^2 - 2x_1x + y_1^2 + y^2 - 2y_1y \quad (3.9)$$

$$R_0^2 = x_0^2 + x^2 - 2x_0x + y_0^2 + y^2 - 2y_0y \quad (3.10)$$

Faisons (3.9) - (3.10) on a :

$$R_1^2 - R_0^2 = x_1^2 - x_0^2 + 2x(x_0 - x_1) + y_1^2 - y_0^2 + 2y(y_0 - y_1)$$

$$R_1^2 - R_0^2 - x_1^2 + x_0^2 - 2x(x_0 - x_1) - y_1^2 + y_0^2 = 2y(y_0 - y_1)$$

$$y = \frac{R_1^2 - R_0^2 - x_1^2 + x_0^2 - y_1^2 + y_0^2}{2(y_0 - y_1)} - x\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right)$$

posons :

$$N = \frac{R_1^2 - R_0^2 - x_1^2 + x_0^2 - y_1^2 + y_0^2}{2(y_0 - y_1)}$$

En remplaçant la valeurs de N on obtient :

$$y = N - x\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right)$$

donc

$$y^2 = N^2 + x^2\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right)^2 - 2Nx\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right)$$

En remplaçant les valeurs de y et y² dans l'équation 3.10 on aura :

$$R_0^2 = x_0^2 + x^2 - 2x_0x + y_0^2 + N^2 + x^2\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right)^2 - 2y_0N - 2y_0x\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right)$$

$$x^2\left[\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right)^2 + 1\right] + x\left[2y_0\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right) - 2N\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right) - 2x_0\right] + (x_0^2 + x^2 - N^2 - R_0^2 - 2y_0N^2) = 0$$

On pose :

$$A = \left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right)^2 + 1$$

$$B = 2y_0\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right) - 2N\left(\frac{x_0 - x_1}{y_0 - y_1}\right) - 2x_0$$

$$C = x_0^2 + x^2 - N^2 - R_0^2 - 2y_0N^2$$

On obtient l'équation de seconde degré de type : $Ax^2 + Bx + C = 0$

La résolution de cette équation nous donnera les abscisses des points d'intersections des cercles.

On calcule Δ :

$$\Delta = B^2 - 4AC = [2y_0(\frac{x_0-x_1}{y_0-y_1}) - 2N(\frac{x_0-x_1}{y_0-y_1}) - 2x_0]^2 - 4[(\frac{x_0-x_1}{y_0-y_1})^2 + 1](x_0^2 + x_1^2 - N^2 - R_0^2 - 2y_0N^2)$$

$$xp_1 = \frac{-B - \sqrt{\Delta}}{2A} = \frac{-[2y_0(\frac{x_0-x_1}{y_0-y_1}) - 2N(\frac{x_0-x_1}{y_0-y_1}) - 2x_0] - \sqrt{\Delta}}{2[(\frac{x_0-x_1}{y_0-y_1})^2 + 1]}$$

$$xp_2 = \frac{-B + \sqrt{\Delta}}{2A} = \frac{-[2y_0(\frac{x_0-x_1}{y_0-y_1}) - 2N(\frac{x_0-x_1}{y_0-y_1}) - 2x_0] + \sqrt{\Delta}}{2[(\frac{x_0-x_1}{y_0-y_1})^2 + 1]}$$

$$yp_1 = \frac{-2x_1(x_1 - x_0) + y_1^2 + x_1^2 - y_0^2 - x_0^2 + R_0^2 - R_1^2}{2(x_1 - x_0)}$$

$$yp_2 = \frac{-2x_2(x_1 - x_0) + y_1^2 + x_1^2 - y_0^2 - x_0^2 + R_0^2 - R_1^2}{2(x_1 - x_0)}$$

L'intersection entre les deux cercles sont les deux points P_1 et P_2 (Figure3.3) dont leurs coordonnées sont (xp_1, yp_1) et (xp_2, yp_2) respectivement.

Algorithme Approche 1 :

Tantque Rcercle > R_B **faire**

Le station de base exécute cet algorithme pour trouver l'ensemble de couverture minimale ($C_{p_{\min}}(i)$).

1. **Initialement** : la station de base dispose d'un ensemble C de capteurs qui se croisent avec la circonférence de Q ;
2. Angle actuel \leftarrow Angle final ($S_{\text{défaut}}$) ;
3. $C_{\min} \leftarrow S_{\text{défaut}}$;
4. **Tantque** Angle actuel < 360 **faire**
5. trouver $S_i/S_i \in C$ et possède un angle de départ < Angle actuel et qui a un Angle final aussi loin que possible.
6. $C_{p_{\min}}(i) \leftarrow C_{p_{\min}}(i) \cup S_i$;
7. Angle actuel = Angle final (S_i) ;
8. **Fin Tantque**
9. $C_{\min} \leftarrow C_{\min} \cup C_{p_{\min}}(i)$;
10. Rcercle $\leftarrow \max R - (r_{\min})/2$;
11. **Fin Tantque**

Deuxième approche

Dans cette deuxième approche, le rayon de la zone diminue avec un pas fixe qui est égale à $r_{\min}/2$. on peut l'écrire formellement de la manière suivante :

$$R(i) = R(i - 1) - (r_{\min}/2)$$

Avec :

- $R(i)$: le rayon de la zone d'intérêt de la i^{eme} itération ;
- r_{\min} : la valeur minimale des rayons de capteurs ;

Algorithme Approche 2 :

Tantque $R_{\text{cercle}} > R_B$ **faire**

La station de base exécute cet algorithme pour trouver l'ensemble de couverture minimale ($C_{\min}(i)$).

1. **Initialement** : la station de base dispose d'un ensemble C de capteurs qui se croisent avec la circonférence de Q ;
2. Angle actuel \leftarrow Angle final ($S_{\text{défaut}}$) ;
3. $C_{\min} \leftarrow S_{\text{défaut}}$;
4. **Tantque** Angle actuel < 360 **faire**
5. trouver $S_i/S_i \in C$ et possède un angle de départ $<$ Angle actuel et qui a un Angle final aussi loin que possible.
6. $C_{\min}(i) \leftarrow C_{\min}(i) \cup S_i$;
7. Angle actuel = Angle final (S_i) ;
8. **Fin Tantque**
9. $C_{\min} \leftarrow C_{\min} \cup C_{\min}(i)$;
10. $R_{\text{cercle}} \leftarrow R_{\text{cercle}} - (r_{\min})/2$;
11. **Fin Tantque**

Etape 3

Afin de maintenir la durée de vie du réseau, la station de base exécute plusieurs fois les deux premières étapes pour créer plusieurs ensemble minimaux $C_{\min}(i)$ qui couvrent toutes la surface.

3.5 Exemple d'application

Cet exemple explique étape par étape l'algorithme amélioré, qui assure la couverture d'une surface. Considérons un réseau de capteurs sans fil de 50 nœuds, déployés aléatoirement dans lequel, les cercles en rouge spécifient la zone de détection de chaque nœud et la zone d'intérêt schématisée par un grand cercle bleu. Afin de simplifier les calculs nous considérons que le rayon de couverture des nœuds capteurs sont homogènes (le rayon $r = 25$). (Voir figure 3.3)

3.5.1 Première itération

Première étape

Après avoir obtenu les nœuds qui sont en intersection avec la circonférence de la zone d'intérêt, CNode exécute l'algorithme 1 pour déterminer l'ensemble de couverture minimale (C_{\min}) du périmètre de cette zone, $C_{\min} = \{2,3,6,28,30,35,37,50\}$, au préalable il exécute les étapes suivantes :

- Trouver les angles de couverture de chaque capteur de l'ensemble (C) ;
- Trouver l'intervalle de couverture [Angle de départ , Angle final] de chaque nœud capteur de l'ensemble (C) ;
- Trouver le capteur ayant le plus grand angle de couverture $S_{\text{défaut}}$ ($S_{\text{défaut}} = \text{nœud}(35)$) ;

Le tableau 3.1 indique les intervalles et l'angle de couverture de chaque nœud de C_{\min} .

Nœuds	Intervalle de couverture	Angle de couverture
02	[253.86° , 313.45°]	59.59°
03	[350.04 , 48.65°]	58.69°
06	[120.89 , 180.02°]	59.13°
28	[82.2 , 136.16°]	53.96°
30	[176.35 , 236.03°]	59.68°
35	[200.33 , 260.32°]	59.99°
37	[296.32 , 354.74°]	58.43°
50	[32.80 , 85.89°]	53.09°

TABLE 3.1 – Intervalle et angle de couverture

Deuxième étape

Elle consiste à :

- Poser Angle de départ de $S_{\text{défaut}}$ égale à 0° et redéfinir les angles des autres nœuds ;
- Trouver les nœuds S_i qui vérifie cette condition : Angle de départ (S_j) < Angle de départ (S_i) < Angle final (S_j) et angle final de S_i est aussi loin que possible.

Nœuds	Intervalle de couverture	Angle de couverture
35	$[0^\circ, 59.99^\circ]$	59.99°
02	$[53.53, 113.12^\circ]$	59.59°
37	$[95.99, 154.41^\circ]$	58.43°
03	$[149.71, 208.31^\circ]$	58.69°
50	$[192.46, 245.55^\circ]$	53.09°
28	$[241.87, 295.83^\circ]$	53.96°
06	$[280.55, 339.69^\circ]$	59.13°
30	$[336.02, 395.70^\circ]$	59.68°

TABLE 3.2 – Redéfinition des intervalles de couverture

La figure 3.3 représente les résultats obtenus de la première itération :

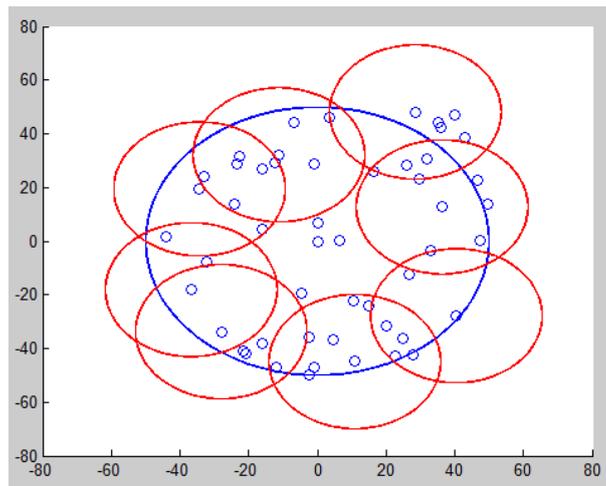


FIGURE 3.3 – Couverture du premier périmètre

3.5.2 Deuxième itération

Elle consiste à définir un autre cercle de rayon inférieur au rayon de la zone d'intérêt avec un pas fixe égale $r/2$ (deuxième approche) et le couvrir d'une manière à ce que la zone de couverture de tous les nœuds se chevauche avec la zone de couverture du nœud C_{Node} qui est représenté par un cercle noir au centre de la zone d'intérêt. (voir figure 3.4)

En suivant les mêmes étapes de la première itération. On obtient : $C_{2_{min}} = \{9, 10, 24, 40, 46\}$

Nœuds	Intervalle de couverture	Angle de couverture
09	[67.63° , 151.25°]	83.61°
10	[297.28° , 14.98°]	77.69°
24	[13.73° , 90.67°]	76.94°
40	[145.48° , 223.48°]	78°
46	[221.05° , 299.29°]	78.23°

TABLE 3.3 – Intervalles et angles de couverture

Nœuds	Intervalle de couverture	Angle de couverture
09	[0° , 83.61°]	83.61°
40	[77.84° , 155.85°]	78°
46	[153.41° , 231.65°]	78.23°
10	[229.64° , 307.34°]	77.69°
24	[306.09° , 383.04°]	76.94°

TABLE 3.4 – Redéfinition des intervalles de couverture

La figure 3.4 représente les résultats obtenus de la deuxième itération.

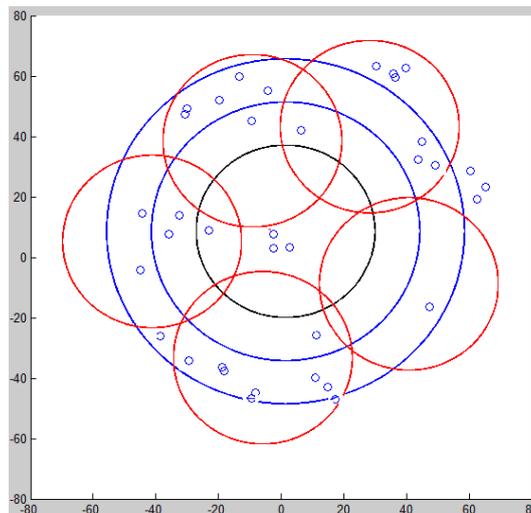


FIGURE 3.4 – Couverture du deuxième périmètre

La figure 3.5 illustre la couverture totale de la zone d'intérêt et le nombre minimum de capteur est : $C_{\min} = C1_{\min} \cup C2_{\min}$
 $C_{\min} = \{2,3,6,28,30,35,37,50,9,10,24,40,46\} / |C_{\min}| = 13$ Nœuds.

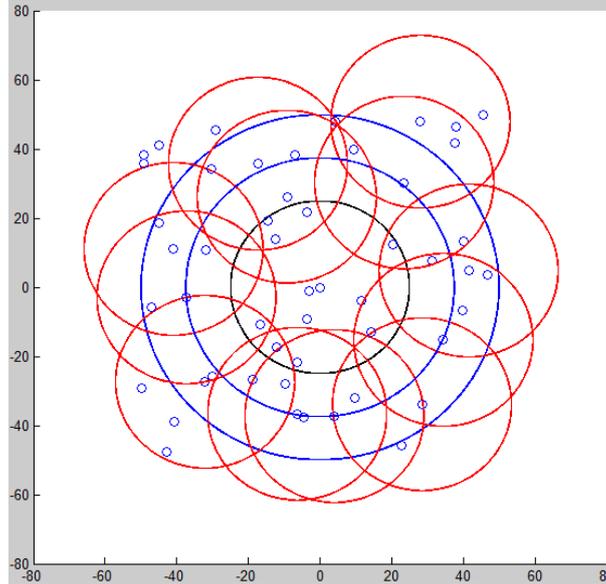


FIGURE 3.5 – Couverture de zone

3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un algorithme distribué de surveillance périmétrique et apporté notre contribution permettant le maintien d'une couverture totale dans les réseaux de capteurs hétérogènes. La solution proposée est basée sur la recherche des ensembles minimaux qui couvrent entièrement une surface en ordonnant l'activité des capteurs.

Dans le chapitre suivant, nous procédons à la validation de la solution proposée à travers des scénarios de simulation. Cette dernière permet de calculer certains paramètres de performance, tels que le nombre de nœuds actifs et le taux de couverture.

CHAPITRE 4

SIMULATION ET EVALUATION DES PERFORMANCES

4.1 Introduction

Après avoir détaillé le fonctionnement du protocole proposé, nous procédons dans le présent chapitre à l'évaluation de ses performances. Nous allons présenter dans la première partie les paramètres de simulation, puis nous détaillerons l'environnement de la simulation. Dans la deuxième partie, nous comparons les résultats fournis par le protocole proposé en utilisant les deux approches.

4.2 Environnement de la simulation

Les résultats présentés sont obtenus à partir d'un réseau composé de nœuds déployés sur une zone carrée de dimension 100×100 (m²). La zone d'intérêt se situe dans ce dernier et elle est sous forme d'un cercle de rayon égale à 50m ($R_{\text{cercle}}=50$).

4.2.1 Choix du langage de programmation

Afin de valider expérimentalement l'algorithme de couverture proposé, nous avons choisi d'utiliser MATLAB 7.9 (matrix laboratory) qui est un logiciel de calcul numérique développé par la société The MathWorks. Il permet la manipulation de matrices, afficher des courbes et des données, mettre en œuvre des algorithmes et créer des interfaces utilisateurs. MATLAB contient également une interface graphique puissante afin de visualiser les résultats sous forme de graphes [44].

4.2.2 Variables descriptives du système

Energie résiduelle : elle est exprimée par la différence entre l'énergie courante et l'énergie consommée par un capteur.

Coordonnées d'un capteur sur un plan 2D : c'est l'affectation de deux valeurs aléatoires (x et y), comprises entre 0 et la taille de la zone du déploiement, à chaque capteur sur un plan à deux dimensions.

Distance entre deux capteurs : c'est la distance euclidienne entre un capteur de coordonnées (x, y) et un autre de coordonnées (x', y') :

$$d = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$$

*Etat du capteur : nous considérons que le capteur peut avoir trois états : actif, passif et en écoute.

4.3 Les Paramètres de simulation

4.3.1 Méthode d'évaluation de la couverture

Pour l'évaluation de la couverture, la zone de déploiement est divisée en cellules de 1×1 (m²). Une cellule est considérée couverte si son centre est couvert (Figure 4.1). Le pourcentage de zone couverte est alors le rapport entre le nombre de cellules couvertes par au moins un capteur et le nombre total de cellules.

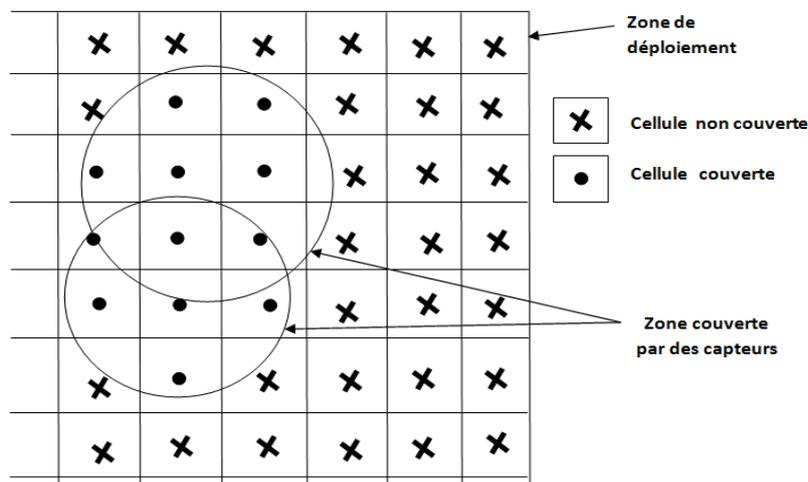


FIGURE 4.1 – Méthode d'évaluation de la couverture

4.3.2 Modèle d'énergie

Le modèle radio utilisé pour calculer l'énergie consommée en émission et en réception des messages, est celui proposé par Heinzelman et al. [45] (figure 4.2).

L'énergie consommée lors de la transmission est donnée par :

$$E_e = E_{elec} * pk + E_{amp} * pk * d^2$$

Par contre l'énergie consommée à la réception, est donnée par :

$$E_r = E_{elec} * pk$$

Où :

- E_{elec} : l'énergie électronique (énergie consommée par le transmetteur électronique), elle est fixée à 100 pJ/bit.
- E_{amp} : l'énergie nécessaire pour l'amplification (l'énergie consommée par l'amplificateur de l'émetteur), elle est fixée à 50 nJ/bit.
- Pk : la taille en bits d'un paquet de données.
- d : la distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur d'un paquet de données.

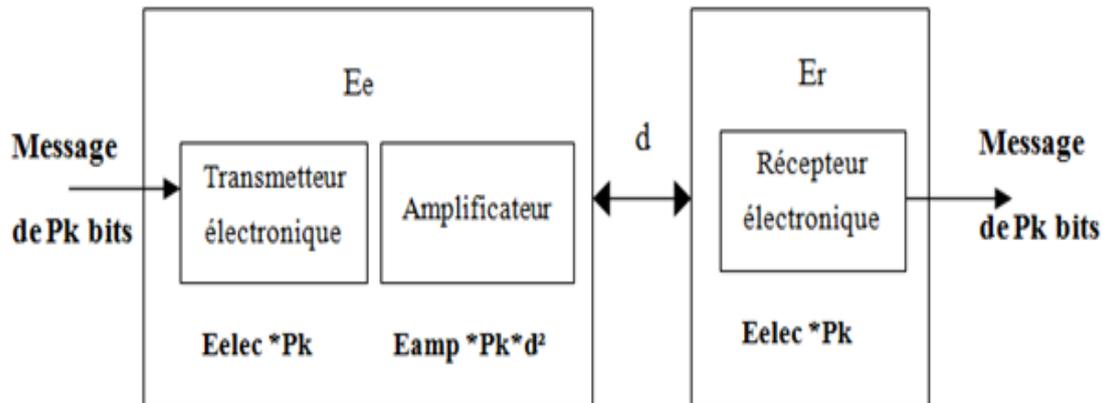


FIGURE 4.2 – Le modèle d'énergie

Les sources d'énergie des nœuds ont été initialisées à 1 joule. La taille d'un message envoyé par un capteur (comportant ses coordonnées et son rayon de captage), est fixée à 32 bits.

4.4 Les paramètres de performances

Les critères de performances retenus lors de l'évaluation de l'algorithme sont : (1) le pourcentage de nœuds actifs, (2) le taux de couverture, (3) le pourcentage d'énergie consommée, et (4) l'équilibrage de charge.

4.4.1 Le nombre de nœuds actifs

C'est le nombre minimal de nœuds actifs qui assurent la couverture de la zone d'intérêt.

4.4.2 Le taux de couverture

C'est le pourcentage de la zone de déploiement couverte par l'ensemble des nœuds actifs.

4.4.3 Le pourcentage d'énergie totale consommée

Il représente le pourcentage d'énergie totale consommée par chaque nœud durant une période d'activité.

4.4.4 L'équilibrage de charge

Il mesure en moyenne la différence de la consommation d'énergie entre les nœuds du réseau.

4.5 Evaluation de performances

A présent, nous comparons les résultats obtenus par les deux approches. Dans un premier temps, nous faisons la comparaison dans un réseau homogène où les capteurs possèdent les mêmes rayons de capture, fixés à 12.5 m ($R_c = 12.5$ m). En suite, nous examinerons le support de l'hétérogénéité où le rayon de capture de chaque capteur varie entre 10 m et 15 m ($R_{min} = 10$ m et $R_{max} = 15$ m).

Dans ce qui suit, nous évaluons les résultats fournis par l'algorithme et ce, en variant le nombre de nœuds déployés entre 50 à 500 avec un pas de 50 nœuds dans la zone d'intérêt.

Premier Cas : les capteurs ont des rayons de couverture homogènes.

Nombre de nœuds actifs

Avoir un nombre réduit de nœuds actifs permet d'économiser l'énergie qui est l'un des objectifs de tout protocole de couverture.

A partir de la figure 4.3, on remarque que plus le nombre de nœuds déployés dans les deux approches croît, plus le nombre de nœuds actifs augment jusqu'à atteindre un certain seuil (nœuds déployés = 250). A partir de ce seuil, le taux de couverture de la zone est total (voir figure 4.4) et le nombre de nœuds actifs commence à décroître à un faible taux. à partir de 500 nœuds le nombre de capteurs actifs devient stable (nombre de nœuds actifs = 55). Ceci est dû au fait que lorsque la densité du réseau augmente, les possibilités d'emplacements des nœuds aux endroits les plus adéquats augmentent.

Nombre de nœuds déployés		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Nombre de nœuds actifs	Approche 1	27	36	47	56	58	57	57	57	56	55
	Approche 2	28	37	48	58	60	58	58	58	57	56

TABLE 4.1 – Nombre de nœuds actifs en fonction du nombre de nœuds déployés

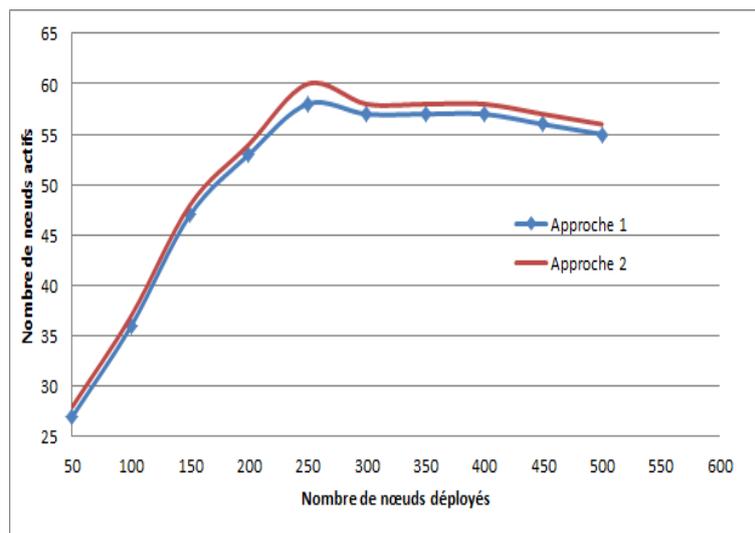


FIGURE 4.3 – Variation du nombre de nœuds actifs en fonction du nombre de nœuds déployés

La figure 4.3 ci-dessus illustre que la première approche est meilleure que la deuxième et ceci est dû à la restriction de la région de chevauchement entre les nœuds actifs.

Taux de couverture

La figure 4.4 représente le pourcentage moyen du taux de couverture par rapport au nombre de nœuds déployés.

A partir de la figure 4.4, on remarque que plus le nombre de nœuds déployés croît, plus le taux de couverture augmente. Ceci est dû au fait que lorsque la densité du réseau augmente, la couverture est plus étendue. On remarque aussi que le pourcentage de couverture dans la première approche est plus élevé que la deuxième jusqu'à ce que le nombre de capteurs déployés atteigne 250 nœuds pour une couverture totale de la zone d'intérêt dans les deux approches.

Nombre de nœuds déployés		50	100	150	200	250	300	350
Taux de couverture	Approche 1	77.04	88.96	97.02	99.5	100	100	100
	Approche 2	67.68	87.77	96.3	99.01	100	100	100

TABLE 4.2 – Taux de couverture en fonction du nombre de nœuds déployés

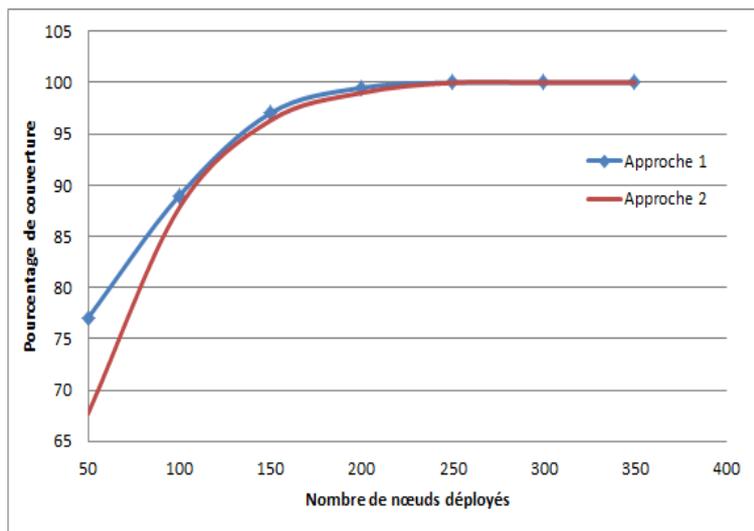


FIGURE 4.4 – Variation du taux de couverture en fonction du nombre de nœuds déployés

Deuxième Cas : les capteurs ont des rayons de couverture hétérogènes.

Nombre de nœuds actifs

A partir de la figure 4.5, on remarque que plus le nombre de nœuds déployés dans les deux approches croît, plus le nombre de nœuds actifs augment jusqu'à atteindre un certain seuil (nœuds déployés = 200). A partir de ce seuil le taux de couverture de la zone est total (voir figure 4.6) et le nombre de nœuds actifs commence à décroître à un faible taux. A partir de 400 nœuds, le nombre de capteurs actifs devient stable (nombre de nœuds actifs = 49). Ceci est dû au fait que lorsque la densité du réseau augmente, les possibilités d'emplacements des nœuds aux endroits les plus adéquats augmentent.

Nombre de nœuds déployés		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Nombre de nœuds actifs	Approche 1	20	34	43	57	53	52	51	49	49	49
	Approche 2	26	36	46	56	54	53	52	50	50	50

TABLE 4.3 – Nombre de nœuds actifs en fonction du nombre de nœuds déployés

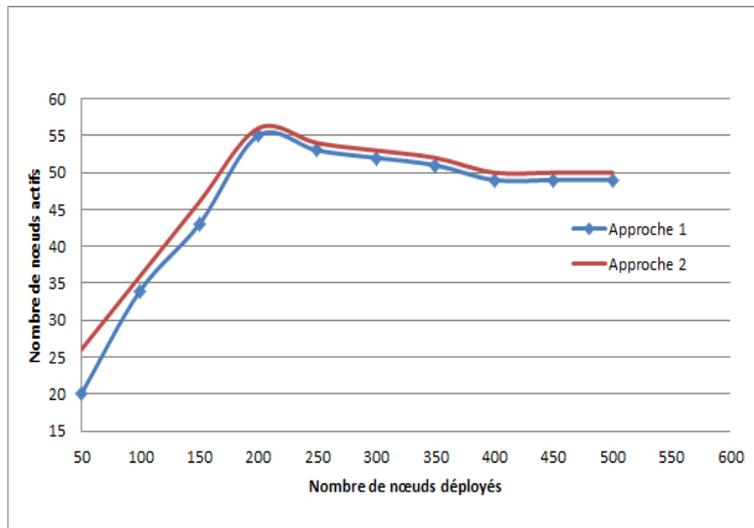


FIGURE 4.5 – Variation du nombre de nœuds actifs en fonction du nombre de nœuds déployés

Taux de couverture

A partir de la figure 4.4 , on remarque que plus le nombre de nœuds déployés croît, plus le taux de couverture augmente. Ceci est dû au fait que lorsque la densité du réseau augmente, la couverture est plus étendue. On remarque aussi que le pourcentage de couverture dans la première approche est plus élevé que la deuxième jusqu'à ce que le nombre de capteurs déployés atteigne 200 nœuds pour une couverture totale de la zone d'intérêt dans les deux approches.

Nombre de nœuds déployés		50	100	150	200	250	300	350
Taux de couverture	Approche 1	79.47	91.03	98.3	100	100	100	100
	Approche 2	76.03	87.06	97.05	99.92	100	100	100

TABLE 4.4 – Taux de couverture en fonction du nombre de capteurs déployés

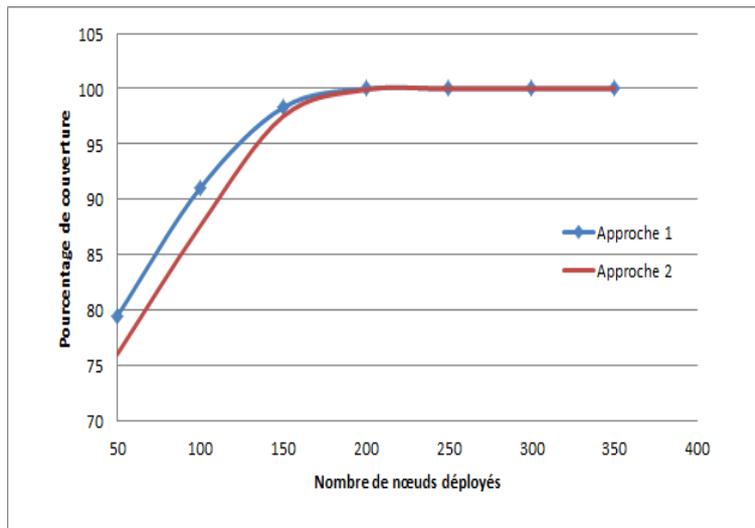


FIGURE 4.6 – Variation du taux de couverture en fonction du nombre de nœuds déployés

4.5.1 Support de l'hétérogénéité

Dans cette section, nous comparons les deux approches par rapport à l'homogénéité et l'hétérogénéité du réseau, où nous mesurons le nombre de nœuds actifs et le taux de couverture en fonction du nombre de nœuds déployés.

La figure 4.7 illustre la comparaison du nombre de capteurs actifs fourni par les deux approches dans le cas d'un réseau homogène et hétérogène. Nous constatons que le nombre de

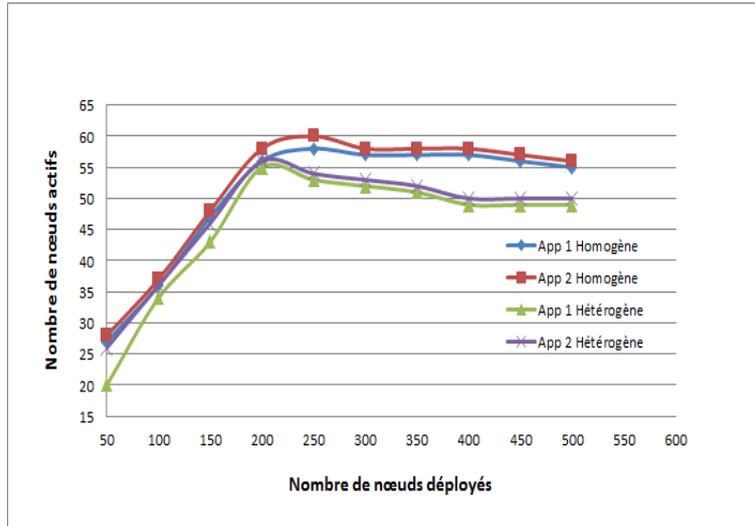


FIGURE 4.7 – Variation du nombre de nœuds actifs en fonction du nombre de nœuds déployés

nœuds actifs ayant des capteurs hétérogène est meilleur que dans le cas homogène et ceci quelque soit l’approche utilisée. En effet, dans le cas hétérogène, les nœuds possédant plus de chances à être actifs sont ceux ayant un grand rayon de couverture, car le protocole choisit les nœuds qui couvrent le plus grand angle du périmètre.

La figure 4.8 illustre la comparaison du taux de couverture fourni par les deux approches dans

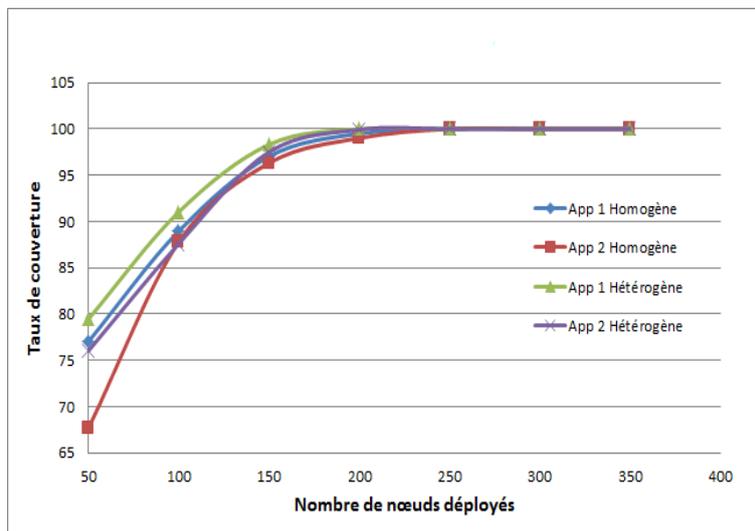


FIGURE 4.8 – Variation du taux de couverture en fonction du nombre de nœuds déployés

le cas d’un réseau homogène et hétérogène. Nous constatons que le taux de couverture dans la première approche dans le cas hétérogène atteint un taux de 100% plus rapidement que les autres cas.

4.5.2 Choix du pas

La figure 4.9 ci-dessous représente la variation du nombre de nœuds actifs et du taux de couverture pour 10000 nœuds déployés dans une zone de $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ ou nous allons former des cercles dont le rayon R est inférieur au rayon de la zone d'intérêt en fonction d'un pas qui varie entre 50 m et 250 m et les rayons des capteurs sont hétérogènes qui varie entre 50 m à 60 m.

On constate que lorsque la couverture totale est indispensable, le pas optimal est égal à 50 m. Par contre, si la couverture totale n'est pas primordiale, dans ce cas, l'utilisateur peut choisir un autre pas supérieur à 50 m, qui correspond aux types de couverture. Ceci est particulièrement intéressant lorsqu'il s'agit de la surveillance des frontières d'une zone d'intérêt (ex : base militaire, frontière d'un pays...), dans ce cas cette technique permet d'établir plusieurs barrières tout au long de la frontière.

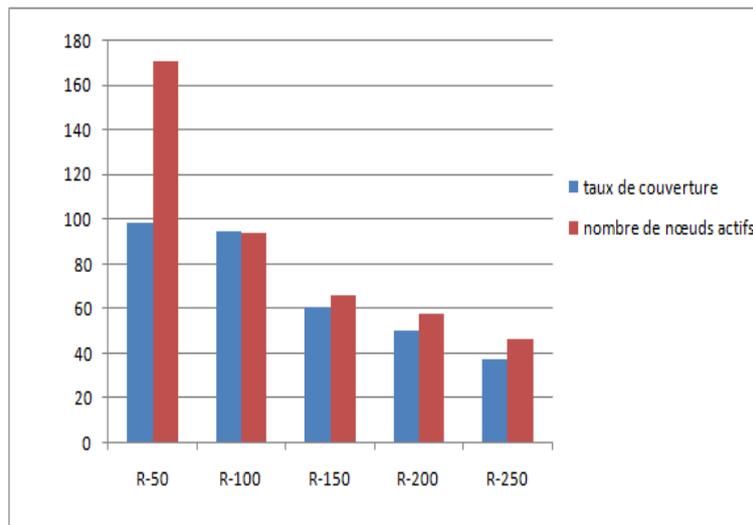


FIGURE 4.9 – Variation du nombre de nœuds actifs et du taux de couverture en fonction du pas

La figure 4.10 représente le résultat obtenu en utilisant un pas égale à 200 m. Cette situation est intéressante lorsque la couverture totale d'une zone d'intérêt n'est pas indispensable mais elle permet plutôt d'établir plusieurs barrières (selon le niveau de sécurité) autour d'une zone d'intérêt.

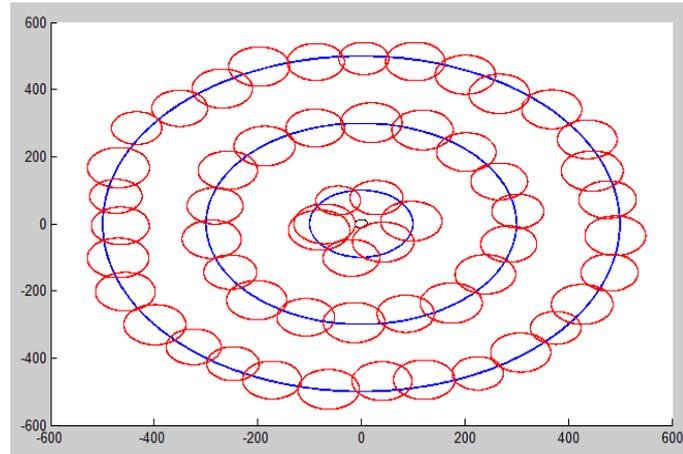


FIGURE 4.10 – Surveillance d'une zone par des barrières

4.5.3 Efficacité énergétique

Afin d'évaluer le pourcentage d'énergie moyenne consommée pendant une seule période de temps, nous avons utilisé le modèle radio de heinzelman et al. [45]. On suppose que les nœuds disposent d'une capacité énergétique égale à 1 Joule. En plus de l'énergie nécessaire pour l'émission et la réception des messages d'activité, chaque nœud actif consomme 15% de son énergie initiale et les nœuds en veille ne consomment rien.

La figure 4.11 représente le pourcentage d'énergie totale consommée par rapport au nombre de nœuds déployés dans le réseau. On constate que l'énergie restante augmente avec l'augmentation du nombre de nœuds déployés, cela s'explique par le fait que le nombre de nœuds en veille lorsque le déploiement est dense est beaucoup plus important que dans le cas contraire.

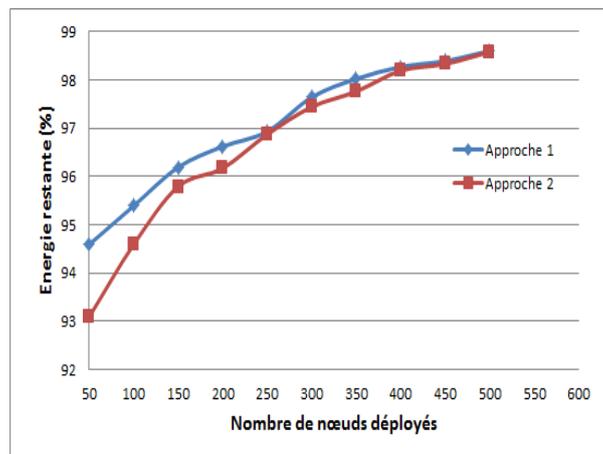


FIGURE 4.11 – Variation de l'énergie restante en fonction du nombre de nœuds actifs

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons comparé deux approches de l'algorithme que nous avons proposées en termes de nombre de nœuds actifs, de taux de couverture et d'efficacité énergétique.

D'après les résultats obtenus, les deux approches préservent une couverture totale avec un nombre réduit de nœuds actifs, ce qui leur permet de réduire la consommation énergétique. Nous avons aussi montré leur efficacité dans le cas d'un réseau hétérogène.

Enfin nous avons constaté que la première approche donne des résultats meilleurs que la deuxième.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce mémoire, nous avons traité le problème de la couverture de zone dans les réseaux de capteurs sans fil en utilisant un nombre minimal de capteurs actifs. Le déploiement dense et aléatoire des capteurs, engendre beaucoup de problèmes, parmi lesquels on cite la redondance ; une même portion de la zone d'intérêt est surveillée par plusieurs capteurs. Cette redondance engendre une consommation inutile d'énergie, ce qui résulte une diminution de la durée de vie du réseau.

En premier, nous avons présenté un état de l'art sur les algorithmes de couverture minimale dans un réseau de capteurs. Ensuite nous en avons sélectionné un protocole qui nous a semblé simple, réaliste, efficace et peu coûteux, pour l'améliorer. Pour cela, nous avons défini deux approches où la première dépend du point ayant la distance maximale et la deuxième qui suit un pas fixe.

Les résultats des simulations ont montré que la première approche est meilleure que la deuxième est ce dans les deux cas où le rayon de couverture des capteurs est homogène et hétérogène.

Comme perspectives de notre travail, l'étude de la mobilité des capteurs pourrait être une direction de recherche intéressante. En effet il s'agira de réévaluer la couverture en fonction de la mobilité.

L'utilisation des systèmes de localisation permettant la connaissance des positions, tel le GPS, induit une consommation d'énergie supplémentaire ainsi qu'un coût de production plus élevé. Là encore, la position d'un capteur peut être calculée à travers la force du signal reçu.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Y. Sankarasubramaniam I.F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. *A Survey on Sensor Networks*. IEEE Communications Magazine, August 2002.
- [2] J. Polastre R. Szewczyk K. Whitehouse A. Woo D. Gay J. Hill M. Welsh E. Brewer P. Levis, S. Madden and D. Culler. *TinyOS : An Operating System for Sensor Networks*. 116-143.
- [3] Y. Challal. *réseau de capteur sans fil*. support de cours, 17/11/2008.
- [4] M. Marot A. Delye, V. Gauthier and M. Becker. *Etat de l'art sur les réseaux de capteurs*. Rapport de Recherche INT N-05001RST GET-INT, UMR5157 SAMOVAR, Institut National des Télécommunications, Evry, France, 2005.
- [5] E. Cayirci Y. Sankarasubramaniam I. Akyildiz, W. Su. *A survey on sensor Networks*. IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, Août 2002.
- [6] D.Budhaditya M.David, O. Davenport and F. J. Ross. *Wireless propagation and coexistence of medical body sensor networks for ambulatory patient monitoring*. In Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, BSN 2009, Berkeley, CA, USA, 3-5 June 2009, pages 41-45.IEEE Computer Society, 2009.
- [7] T. Hasiotis O. Sekkas V. Tsetsos, G. Alyfantis and S. Hadjiefthymiades. *Commercial wireless sensor networks : Technicaland business issues*. In 2nd International Conference on Wireless on Demand Network Systems and Service (WONS 2005), 19-21 January 2005, St. Moritz, Switzerland, pages 166-173. IEEE Computer Society, 2005.
- [8] J. Hill J. Polastre and D.E. Culler. *Versatile low power media access for wireless sensor networks*. In Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04), pp.95-107, Baltimore,MD, USA, November 2004. ACM press.
- [9] B.Romdhani. *Thèse de doctorat. Exploitation de l'hétérogénéité des réseaux de capteurs et d'actionneurs dans la conception des protocoles d'auto-organisation et de routage*. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Décembre 2012.

- [10] T. Watteyne. *Energy-Efficiency Self-Organisation for Wireless Sensor Network*. Doctorate Thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, N° 2008-ISAL-0082, 2008.
- [11] M.Cardei and J.Wu. *Coverage in Wireless Sensor Networks*. Department of Computer Science and Engineering Florida Atlantic University Boca Raton, FL 33431.
- [12] J.Carle D.Simplot-Ryl A.Gallais, F.Ingelrest. *Maintien de la couverture de surface dans les réseaux de capteurs avec une couche physique non idéale*. Univ. Lille 1. 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, FRANCE, 2006.
- [13] J.Beaudaux. *Partitionnement logique dans les réseaux de capteurs sans fil*. Université de Strasbourg, Août 2010.
- [14] A. Gallais. *Ordonnancement d'activité dans les réseaux de capteurs : l'exemple de la couverture de surface*. Univ. Lille 1. 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, FRANCE, 2006.
- [15] M. T. Thai Y. Li M. Cardei and W. Wu. *Energy-Efficient Target Coverage in Wireless Sensor Networks*. . In 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 3 : 1976-1984, 2005.
- [16] M. Potkonjak S. Meguerdichian, F. Koushanfar and M. Srivastava. *Coverage Problems in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks*. IEEE Infocom 2001, Vol 3, pp 1380-1387, April 2001.
- [17] P.-J. Wan X.-Y. Li and O. Frieder. *Coverage in wireless ad-hoc sensor networks*. IEEE Trans. Comput. 52 :753-763, 2003.
- [18] G. Qu G. Veltri and M. Potkonjak S. Megerian, F. Koushanfar. *Exposure in wireless sensor networks : Theory and practical solutions*. Wireless Networks 8(5) :443-454, 2002.
- [19] M. Potkonjak S. Meguerdichian, F. Koushanfar and M. Srivastava. *Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks, Proc. IEEE InfoCom (InfoCom'01)*, Anchorage, AK, pp. 115-121, April 2001.
- [20] G. Qu G. Veltri, Q. Huang and M. Potkonjak. *Minimal and maximal exposure path algorithms for wireless embedded sensor networks, Proc. 1st Int. Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, Los Angeles, pp. 40-50., Nov. 2003.
- [21] G. Qu S. Meguerdichian, F. Koushanfar and M. Potkonjak. *Exposure in wire less ad-hoc sensor networks, Proc. 7th Annual Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom'01)*, Rome, Italy, pp. 139-150., July 2001.
- [22] S. V. Fomin and I. M. Gelfand. *Calculus of Variations*. Dover Publications, Oct. 2000.
- [23] P. Ramanathan T. Clouqueur, V. Phipatanasuphorn and K. K. Saluja. *Sensor deployment strategy for target detection, Proc. 1st ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02)*, Atlanta, GA, pp. 42-48., Sept. 2002.
- [24] K. Sugihara A. Okabe, B. Boots and S. N. Chiu. *Spatial Tessellations : Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. 2nd ed., Wiley, July 2000.

- [25] S. Adlakha and M. Srivastava. *Critical density thresholds for coverage in wireless sensor networks*, Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC'03), New Orleans, LA, pp. 1615-1620, Louisiana., Mar. 2003.
- [26] S. Poduri and G. S. Sukhatme. *Constrained coverage in mobile sensor networks*, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA'04), New Orleans, LA, pp. 40-50., April-May 2004.
- [27] J. O'Rourke. *Art Gallery Theorems and Algorithms*, Oxford Univ. Press, Oxford, UK, 1987.
- [28] K. Chakrabarty S. S. Dhillon and S. S. Iyengar. *Sensor placement for grid coverage unde imprecise detections*, Proc. 5th Int. Conf. Information Fusion (FUSION'02), Annapolis, MD, pp. 1-10., July 2002.
- [29] M. Mataric A. Howard and G. Sukhatme. *Mobile sensor network deployment using potential fields : A distributed scalable solution to the area coverage problem*, Proc. 6th Int. Symp. Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS'02), Fukuoka, Japan, pp. 299-308, June 2002.
- [30] O. Khatib. *Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots*, Int. J. Robotics Res. 5(1) :90-98, 1986.
- [31] Y. Zou and K. Chakrabarty. *Sensor deployment and target localization based on virtual forces*, Proc. . IEEE InfoCom (InfoCom'03), San Francisco, CA, pp. 1293-1303, April 2003.
- [32] Y. Zou and K. Chakrabarty. *Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks*, Trans. IEEE Embedded Comput. Syst. 3(1) :61-91, 2004.
- [33] N. Heo and P. K. Varshney. *A distributed self-spreading algorithm for mobile wireless sensor networks*, Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC'03), New Orleans, LA, pp. 1597-1602., March 2003.
- [34] G. Cao G. Wang and T. LaPorta. *Movement-assisted sensor deployment*, Proc. IEEE InfoCom (InfoCom'04), Hong Kong, pp. 80-91., March 2004.
- [35] G. Cao G. Wang and T. LaPorta. *A bidding protocol for deploying mobile sensors*, Proc. 11th IEEE Int. Conf. Network Protocols (ICNP'03), Atlanta, GA, pp. 80-91, Nov. 2003.
- [36] H. Qi K. Chakrabarty, S. S. Iyengar and E. Cho. *Grid coverage for surveillance and target address in distributed sensor networks*. IEEE Trans. Comput. 51(12) :1448-1453, Dec. 2002.
- [37] Y. Zou and K. Chakrabarty. *Uncertainty-aware sensor deployment algorithms for surveillance applications*, Proc. . IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM'03), Dec. 2003.

- [38] M. S. Obaidat S. Misra, M. P. Kumar. *Connectivity preserving localized coverage algorithm for area monitoring using wireless sensor networks*. 2010 Elsevier B.V. All rights reserved, 2010.
- [39] P. Santi. *Santi, Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. Wiley, May 2005.
- [40] C.-F. Huang and Y.-C. Tseng. *The coverage problem in a wireless sensor network*, Proc. 2nd ACM Int. Conf. Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'03), San Diego, CA, pp. 115-121, Sept. 2003.
- [41] LeiShu GuangjieHan Chuan Zhu, Chunlin Zheng. *A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks*. Journal of Network and Computer Applications, pp. 619-632, 2012.
- [42] Fan Ye · Honghai Zhang · Songwu Lu · Lixia Zhang · Jennifer Hou. *A randomized energy-conservation protocol for resilient sensor networks*. Published online : 27 April 2006, Springer Science + Business Media, 2006.
- [43] A. M. Khedr et W. Osamy. *Minimum perimeter coverage of query regions in a heterogeneous wireless sensor network*. Information Sciences, pp.3130-3142, 2011.
- [44] <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [45] A. Chandrakasan W-R. Heinzelman and H. Balakrishnan. *Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks*. In Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, pages 3005-3014, Janvier 2000.
- [46] A. M. Khedr W. Osmay. *Identifying coverage perimeter of heterogeneous wireless sensor networks*. Mathematics Dept., Faculty of Science, Zagazig University, Zagazig, Egypt, 2009.

Résumé

Le problème de la couverture a été examiné minutieusement dans les réseaux de capteurs sans fil durant ces dernières décennies, plusieurs algorithmes ont été proposés pour remédier à ce problème. Le but de ce travail étant de proposer un algorithme distribué de couverture totale de la zone d'intérêt en utilisant un nombre réduit de nœuds actifs afin de conserver l'énergie des capteurs.

Dans ce travail, nous avons contribué à l'extension d'un algorithme de surveillance d'un périmètre à une surveillance de toute la surface de la zone d'intérêt. Une fois que le périmètre est couvert, nous formons des cercles dont le rayon est inférieur au rayon de la zone d'intérêt. Nous avons proposé deux approches pour calculer ce rayon, la première consiste à trouver la distance entre le centre et le point le plus loin non couvert et lui soustraire un pas fixe, pour la seconde approche on soustrait directement un pas fixe du rayon de la zone d'intérêt, la couverture de ces cercles s'effectue de la même manière que la couverture du premier périmètre. Les résultats de la simulations nous indiquent que la première approche assure une couverture totale avec un minimum de capteurs que la seconde approche.

Mots-clés : Réseau de capteurs sans fil, Couverture, Zone d'intérêt, Périmètre, Surveillance.

Abstract

The coverage problem has been carefully considered in wireless sensor networks during the past decades, several algorithms have been proposed to address this problem. The aim of this work, is to propose a distributed algorithm for total coverage of the area of interest using a reduced number of active nodes to conserve the energy of sensors.

In this work, we have contributed to the improvement of an algorithm for monitoring a perimeter to monitoring of the entire surface of the area of interest. Once the perimeter is covered, we form circles with a radius smaller than the radius of the area of interest. We made two approaches to calculate the radius, the first is to find the distance between the center and the furthest point and subtract it uncovered a fixed pitch, and for the second approach a fixed pitch radius of the area is directly subtracted interest, coverage of these circles is done in the same way as the first perimeter. Simulation results indicate that the first approach provides full coverage with a minimum of sensors and the second approach.

Keywords : Wireless sensor networks, Coverage, Area of interest, Perimeter, Monitoring.