



Un Peuple Un But Une Foi

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR,
DES UNIVERSITES ET DES CENTRES UNIVERSITAIRES
REGIONAUX ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ GASTON BERGER DE SAINT-LOUIS
U.F.R DES SCIENCES APPLIQUÉES ET
TECHNOLOGIES**



**Mémoire de Master II Informatique et Technologies de
l'Information et de la Communication**

présenté par

Babacar DIOP

Gestion de la couverture de cibles dans les réseaux de capteurs sans fil

Sous la direction de
M. Dame DIONGUE
Pr. Ousmane THIARE

Année Universitaire 2012-2013

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu celui à qui je suis redevable ma vie, ma modeste forme et ma faible pensée, sans quoi je ne pourrai réaliser ce travail.

J'adresse mes très sincères remerciements à M. Dame DIONGUE, M. Ousmane THIARE, mes encadrants, pour leur sympathie, leur disponibilité, leurs idées, leurs conseils et leurs encouragements qui m'ont permis de mener à bien ce mémoire.

J'exprime ensuite ma plus profonde gratitude à tous les membres de ma famille, spécialement à mes très chers parents pour leur soutien, leur compréhension et leurs encouragements, qui m'ont redonné la force de persévérer dans les moments les plus déterminants.

Enfin un grand merci à tous les membres de ma classe, M2ITIC promotion 2013, avec qui j'ai partagé des moments forts durant l'année scolaire, et pour les discussions, les confrontations d'idées et les petits coups de main dès fois.

Table des matières

1	Introduction générale	7
1.1	Contexte et problématiques	7
1.2	La couverture dans les RCSFs	8
1.3	Objectifs et Contribution	9
1.4	Organisation du mémoire	9
2	Les réseaux de capteurs sans fil : concepts et problématiques	11
2.1	Architecture d'un RCSF	11
2.2	Anatomie d'un nœud capteur	12
2.3	Zone de couverture d'un capteur	14
2.4	Le déploiement des RCSFs	14
2.5	Applications des RCSFs	15
2.6	Topologies et architecture des RCSFs	16
2.6.1	Topologies	16
2.6.2	Architecture protocolaire	18
2.7	Réseau de capteurs : défis et contraintes	19
2.8	Issues de recherche	21
2.8.1	Système des nœuds	21
2.8.2	Les protocoles de communication	22
2.8.3	Les services	22
2.9	Résumé du chapitre	23
3	La couverture dans les RCSFs	24
3.1	Motivations et objectifs de la couverture	24
3.2	Problèmes de couverture dans les RCSFs	25
3.2.1	Types de couverture	25
3.2.2	Déploiement et couverture	25
3.2.3	Ordonnancement d'activité	26
3.2.4	Caractéristiques des algorithmes de couverture	26
3.2.5	Couverture et hétérogénéité des nœuds	27
3.2.6	Couverture et qualité de service	27
3.3	Modèles de couverture	28
3.3.1	Modèles de couverture binaire	29

4	La couverture de cibles dans les RCSFs : état de l'art	31
4.1	La couverture de cibles : objectifs et motivations	31
4.2	Optimisation du placement des nœuds	32
4.2.1	Modélisation du problème	33
4.3	Couverture de cibles : approches centralisées	34
4.3.1	Ensembles couvrants disjoints	35
4.3.2	Ensembles couvrants non-disjoints	36
4.3.3	Ensembles couvrants connectés	39
4.4	Couverture de cibles : approche localisée	41
4.5	Couverture de cibles et rayons de détection ajustables	42
4.6	Couverture de cibles partielle	44
4.7	Couverture de cibles et bande passante	45
4.8	Résumé du chapitre	47
5	Gestion de la couverture de cibles dans les RCSFs	48
5.1	Description du problème	48
5.1.1	Paramètres du problème	48
5.1.2	Objectifs du problème	49
5.1.3	Le problème de la couverture d'ensembles	49
5.1.4	Gestion centralisée de couverture de cibles	50
5.2	Proposition d'un algorithme	53
5.2.1	Description de l'algorithme	53
5.2.2	Initialisation des paramètres de l'algorithme	54
5.2.3	Pseudo-code de AGGENC-P	55
5.2.4	La fonction de profit	56
5.3	Analyse	58
5.4	Résumé du chapitre	59
6	Simulation de AGGENC-P	60
6.1	Plan d'expérience	60
6.2	Implémentation de AGGENC-P	61
6.2.1	Plateforme matérielle et logicielle	61
6.2.2	Environnement de simulation	62
6.2.3	Scénario 1	62
6.2.4	Scénario 2	63
6.3	Comparaison de performances	64
6.3.1	Scénario 3	64
6.3.2	Scénario 4	66
6.3.3	Scénario 5	67
6.4	Résumé du chapitre	68

7	Conclusion générale	69
7.1	Synthèse	69
7.2	Limitations	71
7.3	Perspectives	71

Table des figures

2.1	Réseau de capteur sans fil.	12
2.2	Anatomie d'un nœud capteur sans fil.	13
2.3	Zone de couverture d'un nœud capteur.	14
2.4	Différentes topologies dans les RCSFs.	17
2.5	Architecture des RCSFs.	19
2.6	Issues de recherche dans les RCSFs.	22
4.1	Relation entre couverture de surface et couverture de cibles. .	36
4.2	Ensemble couvrants disjoints et non disjoints.	37
4.3	Les quatre classes de nœuds candidats.	38
4.4	Illustration des ensembles couvrants connectés.	40
4.5	Couverture de cibles et noeuds aux rayons ajustables.	43
5.1	Génération d'ensembles couvrants par un algorithme centralisé.	51
6.1	Taux de longévité du réseau par rapport à la densité des cap- teurs.	63
6.2	Durée de vie du réseau par rapport à la densité des capteurs.	64
6.3	Evolution de la durée de vie du réseau par rapport au rayon de détection des capteurs.	65
6.4	Comparaison de performances de AGGENC-P et Slijepcevic.	66
6.5	Comparaison de performances de AGGENC-P et Zorbas. . .	67

Liste des tableaux

2.1	Capteurs et propriétés physiques.	13
6.1	Résultats de simulation du scénario 5.	68

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Contexte et problématiques

Les récents progrès réalisés dans la miniaturisation des équipements électroniques et électromécaniques et l'évolution des supports de communication sans fil, ont permis le développement de minuscules équipements appelés capteurs, capables d'interagir avec le monde physique, ouvrant la voie à l'émergence des réseaux de capteurs [1]. Depuis leur apparition, les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) ont ouvert de nouvelles thématiques et de nouveaux défis, pour répondre aux besoins de personnes et résoudre des problèmes divers issus d'autres domaines (environnemental, industriel, militaire, médical...). Ces réseaux peuvent être déployés dans des environnements aussi divers qu'une maison, un commerce, un entrepôt, une ville, ou encore dans des environnements hostiles comme un terrain militaire, un volcan, un site de tremblements de terre, etc. Ils s'insèrent également dans d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage. Ils permettent de collecter et de traiter des informations complexes provenant de l'environnement (météorologie, étude des courants, de l'acidification des océans, de la dispersion de polluants, de propagules, etc.).

Les RCSFs sont généralement composés d'un grand nombre de nœuds capteurs multifonctionnels, à faibles coûts et à dimensions réduites. Chaque nœud capteur est capable de détecter des données provenant de l'environnement, d'effectuer si nécessaire certains traitements sur ces données, et de communiquer par une liaison sans fil avec les autres nœuds du réseau. Les nœuds capteurs forment un réseau connecté fonctionnant de manière collective, afin d'accomplir la tâche qui leur est assignée.

Les RCSFs peuvent être déployés dans des environnements accessibles ou hostiles, dans le but de fournir des mesures sur un phénomène avec une précision satisfaisante. Une fois déployés, les nœuds capteurs doivent être en mesure de se configurer eux-mêmes, de s'organiser, afin de former une infrastructure de réseau de capteurs sans fil. Les nœuds capteurs dispo-

sant de sources d'énergie limitées, car fonctionnant le plus souvent sous batteries dont le rechargement n'est pas toujours faisable, doivent tout de même pouvoir fonctionner jusqu'au terme fixé par les objectifs de l'application considérée. Un capteur ayant épuisé sa réserve d'énergie est un capteur mort, et ne pourra plus participer au réseau. Un réseau arrête de fonctionner lorsque le nombre de capteurs restants est insuffisant pour accomplir la tâche assignée. De ce point de vue, la gestion efficace de l'énergie et la maximisation de la durée de vie sont des problématiques fondamentales, caractérisant les RCSFs. Tous les protocoles proposés dans ce domaine doivent prendre en compte la contrainte de l'efficacité énergétique, qui constitue un facteur critique dans la conception d'un RCSF [1, 2].

1.2 La couverture dans les RCSFs

La couverture est un problème fondamental dans les réseaux de capteurs. Elle se réfère à la manière dont un phénomène est observé par les capteurs composant un réseau. Chaque capteur est capable de détecter un phénomène localisé dans une zone de couverture limitée. Tout point se trouvant dans la zone de couverture d'un capteur est dit couvert par ce capteur. La zone de couverture est généralement vue comme un disque, dont le capteur est le centre, et dont le rayon définit la portée de détection du capteur. Ce rayon est souvent appelé rayon de détection.

Trois types de couverture existent dans la littérature [3] : la couverture de surface, la couverture de cibles et la couverture barrière. La couverture de barrière consiste à construire une barrière de réseau de capteurs, permettant de détecter l'intrusion d'un élément mobile à travers cette barrière. On parle de couverture de surface lorsque le phénomène à observer est localisé sous une zone entière. La couverture de surface garantit que tout point dans la zone d'intérêt soit couvert par au moins un capteur du réseau. Au lieu de couvrir toute une zone, la couverture de cibles garantit la couverture d'un ensemble fini de points discrets dans une zone d'intérêt.

La couverture de cibles trouve son écho dans divers domaines (militaire, médical, etc ...), où l'objet d'étude (cibles militaires, patient, ...) se trouve à un emplacement précis, et peut être observé ou suivi par des capteurs environnants, embarqués ou attachés à la cible. Pour certaines applications de couverture de cibles (ex : la surveillance de patients dans un hôpital), des capteurs peuvent être déployés de manière déterministe, c'est-à-dire placés à des endroits précis dans la zone d'intérêt, proches des cibles, pour détecter des données et les reporter vers une station de base connectée aux équipements du réseau. Dans ce cas, le problème posé est celui de l'optimisation du placement des capteurs dans la zone d'intérêt, afin de satisfaire certains objectifs tels que minimiser le nombre ou le coût des capteurs à déployer. Cependant lorsque la position exacte des cibles n'est pas connue

à l'avance, ou que le milieu est inaccessible, disperser aléatoirement les capteurs en surnombre¹ dans la zone d'intérêt constitue la seule alternative au déploiement déterministe. Avec un tel scénario, certains capteurs peuvent se retrouver avec plus de cibles couvertes que d'autres après le déploiement, de même que certaines cibles peuvent être couvertes par plus de capteurs que d'autres cibles. Une organisation s'avère nécessaire pour coordonner l'activité des capteurs dans la zone, afin d'atteindre une bonne qualité de service en terme de couverture, tout en maintenant une gestion efficace de l'énergie. La gestion de la couverture des cibles dans les RCSFs tente de répondre à cette problématique, en proposant des techniques basées sur l'ordonnement de l'activité des capteurs, afin de mieux contrôler la qualité de la couverture dans le réseau.

1.3 Objectifs et Contribution

Notre objectif pour ce travail de recherche, c'est de faire, dans un premier temps, un état de l'art de la couverture de cibles dans les RCSFs. Pour cela, nous passerons en revue les différents problèmes de couverture, ayant été posés dans la littérature, ainsi que les différentes techniques qui ont été proposées pour résoudre ces problèmes. Dans un deuxième temps, nous tenterons de proposer une solution au problème de la gestion de la couverture de cibles dans les RCSFs, en guise de contribution pour ce travail de recherche. Cette solution sera proposée sous forme d'une heuristique gloutonne centralisée, dont les performances seront testées par simulation, et puis comparées aux approches existantes.

1.4 Organisation du mémoire

Ce mémoire est divisé en six chapitres. Après avoir énoncé quelques problématiques de base caractérisant les RCSFs, le premier chapitre introduit la problématique de la couverture de cibles dans les RCSFs, et passe brièvement sur les objectifs de ce type de couverture.

Le second chapitre expose dans un premier temps les généralités sur les RCSFs, en passant en revue les différents modes de déploiement possibles. Ensuite, les contraintes et caractéristiques spécifiques aux RCSFs sont introduites, avant de déboucher sur les différentes issues de recherches.

Les motivations et objectifs de la couverture sont relatés dans le troisième chapitre, ainsi que l'essentiel des problèmes et des modèles de couverture existants dans la littérature.

Le quatrième chapitre présente un état de l'art de la couverture de cibles dans les RCSFs. L'essentiel des problèmes de couverture de cibles y est

1. Les capteurs sont déployés en un nombre largement supérieur à l'optimum nécessaire pour satisfaire les objectifs de couverture.

exposé, avant de mentionner les divers travaux dans la littérature, ayant étudiés ces problèmes, ainsi que les différentes approches de solutions ayant été proposées.

Le cinquième chapitre est consacré à notre contribution pour ce travail de recherche. Il tente d’abord de formaliser le problème de la gestion de la couverture de cibles centralisée dans les RCSFs, et introduit une nouvelle solution, pour la gestion de la couverture ainsi que la gestion de l’énergie. La solution est présentée sous forme d’un algorithme glouton nommé AGGENC-P (Algorithme Glouton de Génération d’ENSEmbles Couvrants - basé sur la Probabilité), procédant par subdivision de la population des capteurs en plusieurs groupes, capable d’assurer chacun la couverture des cibles dans une zone. Le but de l’algorithme est de maintenir la couverture de toutes les cibles dans une zone et d’allonger au maximum la durée de vie du réseau.

Le sixième chapitre est consacré à la simulation des performances de notre algorithme AGGENC-P, et à sa comparaison avec deux autres solutions basées sur les mêmes approches.

Enfin, le dernier chapitre présente une synthèse de notre travail, avant d’esquiver des perspectives pour de futures recherches.

Chapitre 2

Les réseaux de capteurs sans fil : concepts et problématiques

Ce chapitre commence par introduire quelques généralités sur les RCSFs, en passant par le déploiement, certaines applications, et la topologie des RCSFs. Ensuite les contraintes essentielles caractérisant les RCSFs sont présentées, avant de déboucher sur les problématiques de recherche dans ce domaine.

2.1 Architecture d'un RCSF

Un réseau de capteurs sans fil est composé de deux types de nœuds : les capteurs et les puits. Les capteurs relèvent les données du milieu physique et reportent ces données vers un point de collecte appelé puits. Le puits relève les informations remontées par les différents capteurs, et les transmet à un centre de traitement. Contrairement aux nœuds capteurs sans fil, le puits n'est pas caractérisé par une insuffisance de ressources. Il permet d'effectuer des traitements plus avancés et plus spécifiques sur les données. Un exemple de réseaux de capteurs est fourni en figure 2.1 : les capteurs sont déployés aléatoirement dans une zone d'intérêt, et une station de base située à l'extrémité de la zone est chargée de récupérer les données collectées par les capteurs et de les mettre à la disponibilité des utilisateurs concernés. Lorsqu'un capteur détecte un événement pertinent, un message d'alerte est envoyé à la station de base par le biais d'une communication directe ou indirecte (multiple-sauts).

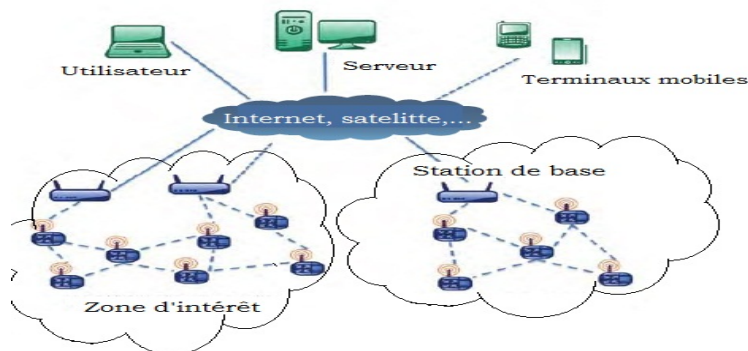


FIGURE 2.1 – Réseau de capteur sans fil.

2.2 Anatomie d'un nœud capteur

Le nœud capteur sans fil constitue l'élément central d'un réseau de capteurs. Il est composé de quatre unités de base :

- *l'unité d'acquisition* : l'unité d'acquisition est composée de capteur(s) capable(s) d'acquérir des mesures numériques sur les paramètres environnementaux et d'un convertisseur Analogique/Numérique (ADC), chargé de convertir l'information relevée et de la transmettre à l'unité de traitement.
- *l'unité de traitement* : l'unité de traitement est composée de deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de transmission. Elle est également composée d'un processeur dont la fréquence est assez faible, moins de 10 MHz pour une consommation de l'ordre de 1 mW, d'une mémoire dont la taille est de l'ordre de 10 Ko de RAM pour les données et de 10 Ko de ROM pour les programmes, et d'un système d'exploitation spécifique. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de communication.
- *l'unité de communication* : l'unité de communication est équipée d'un émetteur-récepteur et intègre les composantes classiques d'un système de communication sans fil. Elle permet à chaque nœud de communiquer avec les autres nœuds du réseau soit directement ou indirectement, et consomme assez d'énergie pour que son fonctionnement soit optimisé. Elle est connectée à l'unité de calcul et consomme plus d'énergie comparée aux autres unités pour accomplir ses différentes fonctions.
- *l'unité d'énergie* : l'unité d'énergie est la composante critique d'un nœud capteur sans fil. Elle est souvent constituée d'une batterie AA normale d'environ 2.2 - 2.5 Ah fonctionnant à 1.5 V. L'unité d'énergie est reliée à toutes les autres unités et fournit à chacune d'elle la quan-

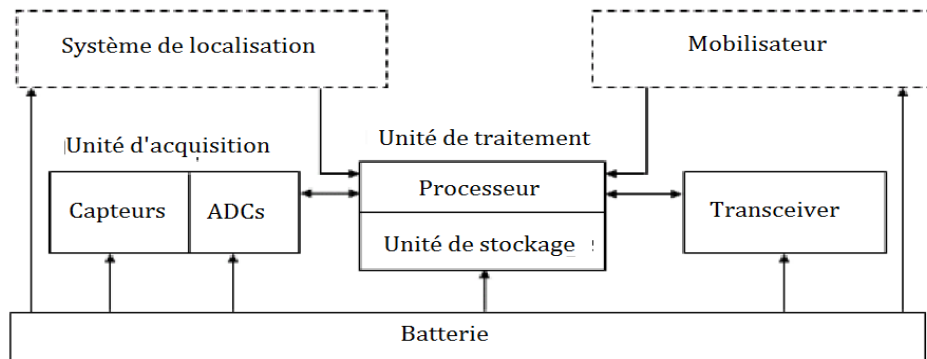


FIGURE 2.2 – Anatomie d'un nœud capteur sans fil.

Types	Exemples	Description
Température	Thermistor/Thermocouple	Mesurer la température
Pression	Baromètre	Mesurer la pression atmosphérique
Optique	Photodiode	Détecter la lumière
Mouvement/Vibration	Accéléromètre/Gyroscope	Mesurer l'accélération d'un corps
électromagnétique	Magnétomètre	Mesurer un champ magnétique
Position	GPS/Inclinomètre	Mesurer les coordonnées géographiques
Humidité	Hygromètre	Mesurer l'humidité
Air	Anémomètre	Mesurer la pression du vent

TABLE 2.1 – Capteurs et propriétés physiques.

tité d'énergie nécessaire à son fonctionnement. Généralement la batterie qu'elle contient n'est pas rechargeable.

Certains capteurs peuvent être munis de composants additionnels comme des mobilisateurs (locomoteurs) qui leur permettent de se déplacer dans une zone d'intérêt et des systèmes de localisation (GPS ou autre) pour pouvoir déterminer leurs coordonnées géographiques. Différents types de capteurs existent. Le choix du capteur dépend généralement des propriétés physiques de l'objet ou du processus à observer : la température, la pression atmosphérique, la lumière, etc. La classification des capteurs peut entre autres, être basée sur d'autres critères comme les méthodes utilisées pour la conversion des données de détection en signaux électriques [2]. Le tableau 2.1 résume quelques propriétés physiques avec des exemples de technologies de capteurs utilisées pour chacune de ces propriétés.

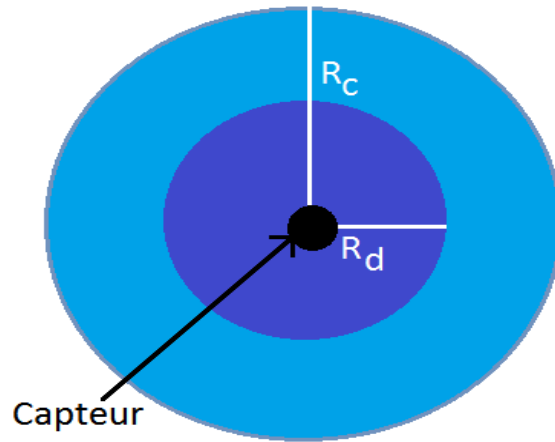


FIGURE 2.3 – Zone de couverture d'un nœud capteur.

2.3 Zone de couverture d'un capteur

Les capteurs fonctionnent avec un modèle à seuil, c'est à dire qu'un capteur possède deux zones : une zone de détection (perception) et une zone de communication. La zone de détection est la zone à l'intérieur de laquelle un évènement peut être relevé par le capteur. La zone de communication est délimitée par le rayon de communication (R_c) du capteur, le plus souvent supérieur au rayon de détection (R_d). Pour schématiser, on considère que ces zones sont représentées par deux cercles qui ont pour centre le capteur comme le montre la figure 2.3.

Une fois déployé, chaque capteur est capable de couvrir une portion d'espace limitée de la zone d'intérêt. L'ensemble des zones de couverture de tous les capteurs d'un réseau constitue la zone de couverture complète du champ.

2.4 Le déploiement des RCSFs

Le déploiement dans les RCSFs pose le problème du placement des nœuds dans une zone d'intérêt. Dépendant des applications et de la nature de l'environnement, les nœuds capteurs peuvent être déployés différemment. Généralement on distingue deux types de déploiement : le déploiement déterministe et le déploiement aléatoire.

Le déploiement déterministe Le déploiement déterministe consiste à placer les nœuds à des emplacements précis dans une zone d'intérêt, de manière à satisfaire un certain nombre d'objectifs en rapport avec l'application. Le déploiement déterministe est souvent effectué dans des environnements accessibles ou lorsque la surface de la zone d'intérêt n'est pas assez

grande. C'est le cas des applications des RCSFs dans le domaine du control industriel et dans le domaine de l'habitat. Des capteurs peuvent être placés à des endroits désirés pour contrôler une chaîne de production, ou surveiller l'utilisation des appareils électriques et électroniques dans des habitations. Le déploiement déterministe peut être effectué par des personnes physiques. L'objectif d'un déploiement déterministe est souvent formulé en accord avec les exigences d'une application donnée.

Le déploiement aléatoire Dans les environnements à très grande surface, hostiles et impénétrables, déployer les capteurs de manière aléatoire dans la zone d'intérêt constitue la seule alternative au placement déterministe. C'est le cas des applications des RCSFs dans les environnements ayant fait l'objet d'un désastre et où la mobilisation de personnes physiques dans la zone n'est pas faisable. Dans ce cas les nœuds peuvent être dispersés dans la zone, par voie aérienne, en utilisant un engin tel qu'un hélicoptère. Le déploiement aléatoire est fréquemment pratiqué dans les RCSFs. En effet l'un des avantages que présentent les RCSFs est qu'ils permettent d'étudier les phénomènes sis à des endroits hostiles en dispersant aléatoirement les nœuds dans la zone d'intérêt. Un des inconvénients du déploiement aléatoire est qu'il n'est pas toujours possible de garantir que les objectifs en termes de couverture seront satisfaits. Par conséquent pour des applications nécessitant une certaine qualité de service, les nœuds sont souvent déployés en surnombre, pour pallier aux limites d'imprécisions liées à la nature du déploiement.

2.5 Applications des RCSFs

Les progrès réalisés dans la miniaturisation des équipements composant les RCSFs, la diminution de coût des micro-capteurs, l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations,...) et l'évolution des supports de communication sans fil, ont élargi le champ d'application des réseaux de capteurs. La diversité des applications à l'heure actuelle est remarquable, et interpelle plusieurs domaines. Ci-dessous, quelques exemples d'applications des RCSFs.

Domaine militaire : La surveillance des forces militaires alliés ou ennemi, des équipements et des munitions de guerre, la surveillance de zones critiques dans les champs de bataille, la détection et la reconnaissance des menaces nucléaires, biologiques ou chimiques, la constatation des dégâts dans un champ de bataille, ...

Domaine médical : La surveillance permanente des patients et la collecte des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant le

diagnostic des maladies. La surveillance des fonctions vitales d'un organisme vivant par des micro-capteurs avalés ou implantés sous la peau. La télésurveillance des données physiologiques provenant des êtres vivants (homme, animal, ...). La possibilité de fournir une interface pour les patients démunis, de faciliter leur observation ainsi que leur mobilité, de pouvoir les diagnostiquer constamment [4, 5].

La maintenance des édifices : La gestion de l'éclairage dans les grands édifices. En effet, l'installation et la gestion de la lumière dans les grands édifices font l'objet de beaucoup de dépenses dans les pays développés. Selon [6], deux tiers (2/3) de la fabrication d'énergie des états-Unis sont destinées aux besoins en énergie des grands édifices commerciaux, et l'éclairage en consomme 40%. Avec l'utilisation de capteurs (de lumière), un gain additionnel de 45% pourrait être obtenu sur l'économie d'énergie.

Control industriel : La détection de la présence de composants nocifs dans les chaînes de production. Certains capteurs peuvent rapidement identifier les fuites dans les agents biologiques et chimiques avant que n'adviennent des dommages sérieux (ou même avant que le produit n'atteigne le grand public) [7]. Le control des matériels (machines) tournants ou mobiles est souvent possible avec de telles applications.

Control et surveillance de l'habitat : L'automatisation et le control de plusieurs équipements pour améliorer la conservation, la convenance et la sûreté globales des habitations. Par exemple, on peut utiliser des capteurs sensibles à l'émission de gaz ou à l'inhalation électrique pour détecter les fuites et les perturbations [8].

2.6 Topologies et architecture des RCSFs

2.6.1 Topologies

Le problème de la topologie a été largement étudié dans les réseaux de capteurs sans fil [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. La topologie se réfère à l'organisation physique des équipements du réseau (nœuds capteurs et puits) dans une zone d'intérêt et à leur configuration durant toute la durée de vie du réseau. Les réseaux de capteurs peuvent être conçus suivant plusieurs scénarios de topologie, présentant une architecture dépendant de la nature (homogène ou hétérogène, statique ou mobile) et de la capacité des équipements du réseau, et du paradigme de communication utilisé. Ci-dessous quelques scénarios de topologie sont présentés.

- *La topologie dans les réseaux homogènes et hétérogènes*

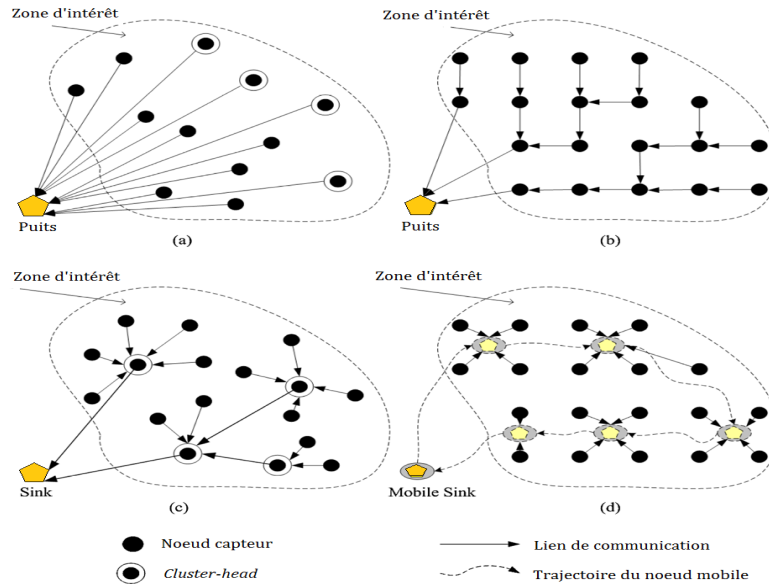


FIGURE 2.4 – Différentes topologies dans les RCSFs.

Dans les réseaux homogènes, tous les nœuds capteurs sans fil possèdent les mêmes fonctionnalités (puissance de détection, capacité de calcul, de communication à l'exception peut-être de leur quantité d'énergie initiale) et jouent les mêmes rôles. La figure 2.4 (b) illustre un réseau de capteurs homogène. Dans un réseau hétérogène, les nœuds capteurs ont des capacités ou fonctionnalités différentes, jouant ainsi des rôles différents dans le fonctionnement du réseau. Par exemple les nœuds d'un réseau hétérogène peuvent être divisés en *clusters* et disposés de manière hiérarchique, chacun assumant un rôle différent dans le processus de routage (transfert des données vers la station de base). La figure 2.4 (c) illustre un tel réseau où seul un nœud (le leader du *cluster* ou *cluster head*) est responsable de la transmission directe des données vers le puits. Tous les autres nœuds ne font que lui transmettre les données collectées.

– *La topologie dans les réseaux statiques et mobiles*

Dans les réseaux statiques, les nœuds ne peuvent pas se déplacer une fois qu'ils ont été déployés. À l'opposé certains réseaux de capteurs peuvent être équipés de nœuds capteurs sans fil disposant de locomoteurs leur permettant de se déplacer dans la zone d'intérêt une fois déployés. La figure 2.4 (d) illustre un RCSF où certains nœuds sont mobiles. Les RCSFs dont tous les nœuds capteurs sont mobiles sont communément appelés les réseaux de capteurs sans fil mobiles alors que les réseaux hybrides incluent à la fois des nœuds capteurs statiques et mobiles. Un nœud capteur mobile possède l'aptitude de se déplacer à des positions précises dans la zone de déploiement du réseau pour accomplir une tâche spécifique. En ce sens, le principal défi

lié aux réseaux de capteurs mobiles constitue l'optimisation de la trajectoire des nœuds mobiles de façon à ne pas compromettre la gestion efficace de l'énergie. Certains travaux [9, 10, 11, 12, 20] se sont focalisés sur l'utilisation des capteurs mobiles pour maintenir la couverture et la connectivité dans les réseaux de capteurs. En outre l'utilisation des capteurs mobiles permet d'accomplir des tâches avancées dans le contexte de la couverture de surface ainsi que le maintien de la fiabilité dans la couverture de barrière.

– *La topologie selon le paradigme de communication*

La communication dans les réseaux de capteurs peut être vu sous deux modèles : le modèle de communication directe (un seul saut ou *single-hop*) et le modèle de communication indirecte (multiple saut ou *multi-hop*). Le modèle de communication directe implique que chaque nœud soit connecté au puits et transmette directement ses données de détection. Il est généralement utilisé dans les réseaux à petite échelle (figure 2.4 (a)). A l'opposé, le modèle de communication multiple-saut fait intervenir des nœuds intermédiaires pour transmettre les données de détection vers le puits (figure 2.4 (b)). Les données sont alors successivement transmises en passant par les nœuds intermédiaires, jusqu'à atteindre le puits. Il est applicable à des architectures de grande de grande taille. Beaucoup d'algorithmes de routage ont été conçus pour optimiser la communication des données dans les réseaux de capteurs.

2.6.2 Architecture protocolaire

En se basant sur la littérature, cinq couches de protocole semblent être indispensables : la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique. Trois couches transversales peuvent être ajoutées à ces cinq comme le montre la figure 2.5. Ces dernières constituent les politiques de gestions de l'énergie, de la connectivité, et des tâches [1, 21, 22, 23]. Les couches transversales implémentent certaines contraintes spécifiques aux RCSFs, qui doivent être prises en compte dans tout le processus de modélisation, de conception d'outils, d'algorithmes et de solutions relatives aux RCSFs. La gestion de l'énergie est vitale dans un RCSF. La gestion de la connectivité est responsable de la configuration et de la reconfiguration des capteurs pour l'établissement et le maintien de la connectivité¹. La gestion des tâches quant à elle, coordonne l'activité des capteurs dans le réseau.

Les cinq autres couches constituent des couches protocolaires classiques du modèle OSI. Ainsi nous avons : la couche application qui permet d'intégrer divers types d'applications. La couche transport permet d'assurer la fiabilité dans le transfert des paquets ainsi que l'évitement des congestions dans un RCSF. La couche réseau se charge du routage des pa-

1. La connectivité garantit la communication entre les nœuds d'un réseau est établie.

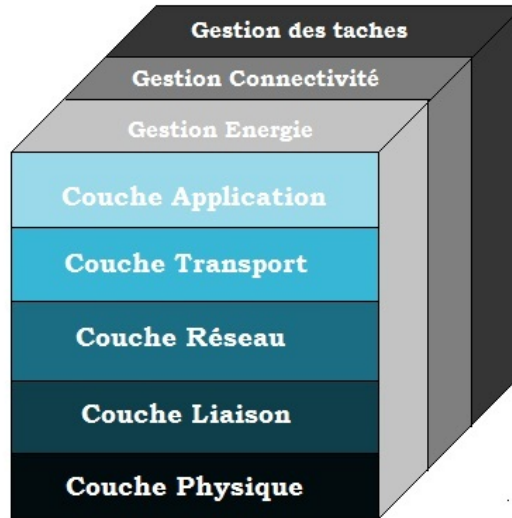


FIGURE 2.5 – Architecture des RCSFs.

quets fournis par la couche transport. La couche liaison de données contrôle l'accès au canal radio partagé. Elle permet d'éviter les interférences entre les transmissions et les effets de collision. La couche physique présente une interface de transmission des flots de données provenant de la couche liaison de données à travers un support de communication physique [1].

2.7 Réseau de capteurs : défis et contraintes

Les réseaux de capteurs présentent dans leur ensemble beaucoup de défis et de contraintes bien qu'ils partagent plusieurs similarités avec les systèmes distribués classiques. Ces contraintes agissent sur la conception des RCSFs et conduisent à la mise en place de protocoles et d'algorithmes spécifiques dans le domaine. Nous décrivons dans cette section les plus importantes contraintes en rapport avec les réseaux de capteurs.

Énergie : Toute activité effectuée par l'une des trois unités de base (détection, traitement et communication) composant un nœud capteur, consomme de l'énergie fournie par la batterie (unité d'énergie). Des résultats expérimentaux ont démontré qu'en général, la transmission de données est plus coûteuse en terme d'énergie que le traitement des données par les nœuds capteurs. Le coût en énergie pour transmettre un bit de donnée est approximativement le même pour l'exécution de milliers d'instructions par un capteur. L'énergie consommée par l'unité d'acquisition est négligeable, au regard de l'énergie consommée par l'unité de communication. Cependant,

dépendant des applications, l'unité d'acquisition est susceptible de faire l'objet d'une consommation non négligeable d'énergie et par conséquent celle-ci doit être largement contrôlée [1, 2, 24].

La communication : Généralement, la communication dans les RCSFs est à la fois influencée par le design des équipements permettant la communication des capteurs entre eux (*transceiver*²), et la nature des médias de transmission utilisés. La transmission et la réception de données par les capteurs requièrent chacune un coût en énergie, qui au regard des contraintes énergétiques caractérisant les RCSFs, ne sont ni l'une ni l'autre des opérations élémentaires [1, 2].

Autonomie : La gestion autonome des capteurs peut être vue sous différentes formes. Dans la littérature, on parle d'auto-organisation ou self-organisation des capteurs pour se référer à leur aptitude à adapter leurs paramètres de configuration en fonction de l'état de l'environnement et du système. On parle également d'auto-optimisation (*self-optimisation*) pour désigner la capacité d'un capteur à observer et à contrôler (optimiser) l'utilisation de ses propres ressources. L'auto-protection (*self-protection*) permet à un capteur de se protéger contre les attaques et intrusions extérieures. Enfin le *self-heal* qui permet aux capteurs d'identifier les perturbations du réseau et de réagir en conséquence [2].

Le passage à l'échelle : Très souvent, le nombre de nœuds déployés pour observer un phénomène est très important (centaines ou milliers). Pour certaines applications, le nombre de nœuds peut aller jusqu'à l'ordre de millions [1] alors que la densité peut varier de quelques nœuds à une centaine de nœuds capteurs par site. Dans [25], l'auteur a conçu une application dans le domaine de la surveillance des habitations, où le nombre de nœuds déployés est de 32 ; pour d'autres applications comme le diagnostic de machines dans le domaine du control industriel, la densité se trouve aux alentours de 300 nœuds capteurs par site [26]. Le schéma et les algorithmes proposés pour la conception du RCSF doivent pouvoir fonctionner avec de telles configurations.

La gestion distribuée : Pour des réseaux constitués de centaines ou de milliers de capteurs, les contraintes énergétiques et de taille font qu'il est impossible de s'appuyer sur des algorithmes centralisés (exécution des instructions à la station de base) pour l'implémentation des protocoles définissant le fonctionnement du réseau et la communication des données. Ce qui implique que les nœuds capteurs doivent pouvoir communiquer entre eux pour prendre des décisions localement, c'est-à-dire sans connaissance de l'état de

2. appareil combinant un émetteur et un récepteur radio

tout le système. Dans la partie consacrée à la couverture dans les RCSFs, différents algorithmes seront étudiés et les caractéristiques qu'ils présentent (centralisé ou distribué) seront exposées clairement.

Contraintes physiques : Les contraintes physiques sont inhérentes à la structure des nœuds capteurs qui exige une technologie de miniaturisation précise des composantes. Mis à part les unités de base, certains capteurs disposent de composants additionnels comme un système de localisation par GPS, un générateur comme le panneau solaire et un mobilisateur[21]. Toutes ces modules doivent s'intégrer sur une seule plateforme physique, afin de composer un minuscule capteur, capable de fonctionner de manière autonome dans divers environnements.

La sécurité : Les capteurs sont exposés à des attaques et intrusions malicieuses pouvant provenir de leurs liaisons sans fil. Par exemple l'une des plus grandes menaces de sécurité est l'attaque de déni de service qui consiste à perturber le fonctionnement d'un réseau de capteurs. Les conséquences peuvent être sévères et peuvent varier d'une application à une autre [2].

2.8 Issues de recherche

Les contraintes spécifiques caractérisant les RCSFs, orientent les différentes problématiques de recherche exposées dans ce domaine. Ces issues interpellent divers domaines et peuvent être classés dans trois grands groupes, à savoir : le système interne des nœuds, les protocoles de communication et la couche des services [27](figure 2.6).

2.8.1 Système des nœuds

Chaque nœud capteur constitue un composant complexe indépendant. C'est-à-dire contrairement aux réseaux sans fil traditionnels (réseaux informatiques) où les équipements peuvent être configurés par des personnes et entretenus par une maintenance régulière, les nœuds capteurs doivent disposer de toutes les caractéristiques et autres dispositifs matériels nécessaires, pour fonctionner de manière autonome dans le réseau. Cette problématique impose une technologie de conception précise des composants physiques et logiciels des nœuds. Ceci est d'autant plus vrai que la technologie des nœuds capteurs est faite de composantes minuscules intégrées en un seul système complexe, et nécessite donc une technologie de miniaturisation précise. Beaucoup de recherches sont encore nécessaires dans la conception, l'implémentation et l'amélioration des plateformes physiques et logicielles, et au niveau de toutes les unités fonctionnelles composant les nœuds. En même temps, les systèmes d'exploitation des nœuds doivent fournir un support logiciel fiable et robuste, pour prendre en compte la diversité des applications.

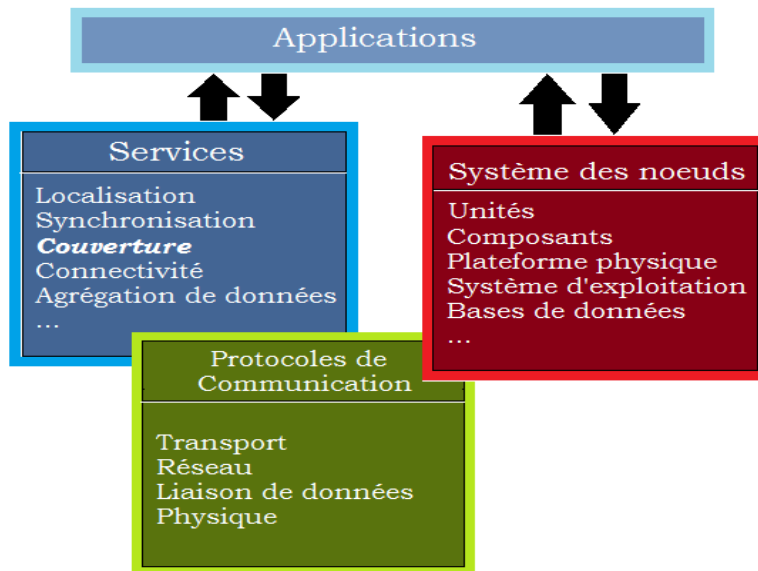


FIGURE 2.6 – Issues de recherche dans les RCSFs.

2.8.2 Les protocoles de communication

Les protocoles de communication permettent l'échange d'informations entre capteurs et la transmission des données détectées vers les centres de traitements (stations de base). Beaucoup de protocoles développés pour les réseaux sans fil traditionnels ne sont pas directement applicables aux RCSFs, dues aux contraintes et caractéristiques spécifiques aux réseaux de capteurs. La spécificité des applications dans les RCSFs, rend les défis concernant les choix de conception des médias de transmission plus importants. Par exemple, les concepteurs de médias de communication doivent prendre en compte les exigences des applications dans le domaine maritime, en concevant des capteurs capables de fonctionner en milieux aqueux. De même que les applications dans les milieux inhospitaliers ont tendance à être affectées par d'importantes interférences, impliquant le choix de médiums de transmission supportant des codages complexes et des schémas de modulation efficaces, prenant en compte les caractéristiques de ces canaux.

2.8.3 Les services

Les services implémentent des modules logiciels facilitant la gestion et la configuration du réseau. Ils permettent d'améliorer l'efficacité globale du réseau et la performance des applications. La couche des services est généralement située en-dessous de la couche des applications et au-dessus de la couche de communication (*middleware*). Beaucoup de services peuvent s'avérer nécessaires pour une application de RCSF. Généralement certains

services sont communs à tous les réseaux. C'est le cas des services de localisation, les services de synchronisation, la gestion de la couverture, l'agrégation des données, la sécurité, etc ... Le service de localisation permet aux nœuds de déterminer leurs coordonnées géographiques. Le service de synchronisation permet de maintenir une échelle de temps commune pour tous les nœuds dans le réseau. La synchronisation permet de rendre d'avantage efficace le service de la couverture dans un réseau. Des techniques de synchronisation efficaces prenant en compte des caractéristiques comme le passage à l'échelle, la dynamique de la topologie des RCSFs doivent être conçues.

La couverture dans un RCSF se réfère à la manière dont les capteurs observent un phénomène dans l'espace physique. Le service de gestion de la couverture permet de contrôler l'activation et la désactivation du module d'acquisition des nœuds, afin de garantir une certaine qualité de service. A la dimension de tout le réseau, il permet de coordonner l'activité de tous les nœuds du réseau par une organisation efficace de façon à atteindre une bonne qualité de couverture. Les issues sur la couverture sont nombreuses et peuvent être interprétées en tenant compte de beaucoup de considérations. La section suivante expose les motivations et objectifs de la couverture dans les RCSFs ainsi que les différents modèles de couverture existants.

2.9 Résumé du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons exposé certains concepts liés aux réseaux de capteurs sans fil, ainsi que les problématiques générales soulevées dans ce domaine. La couverture en tant qu'issue de recherche importante tente de répondre à un certain nombre de problèmes spécifiques aux RCSFs. Le chapitre suivant est consacré à l'étude de la couverture dans les RCSFs.

Chapitre 3

La couverture dans les RCSFs

Ce chapitre expose dans un premier temps les différentes motivations et les objectifs de la couverture dans les RCSFs. Dans un second temps, il tente de cadrer les diverses issues du problème de la couverture. Pour finir, l'essentiel des modèles de couverture dans la littérature est présenté, ainsi que la formulation mathématique associée à chaque modèle.

3.1 Motivations et objectifs de la couverture

La couverture est souvent vue comme une mesure collective de la qualité de service fournie par un réseau, par rapport à l'observation d'un phénomène. Bien qu'il est plus aisé de définir les motivations et objectifs de la couverture en accord avec les exigences d'une application donnée, certaines problématiques communes à presque toutes les applications, placent certaines motivations au cœur du problème de la couverture dans les RCSFs. C'est le cas de la contrainte énergétique. De manière générale, la motivation fondamentale du problème de la couverture c'est d'assurer la bonne gestion de la tâche de détection effectuée par les capteurs, tout en tenant compte des contraintes agissant le réseau [3, 27]. Dans notre analyse, nous considérons une catégorisation des objectifs en deux grands groupes : les objectifs communs aux RCSFs et les objectifs spécifiques à la couverture.

Étant donné que l'efficacité énergétique est essentielle dans la conception d'un réseau de capteur, la gestion de cette contrainte est très souvent posée dans les problèmes de couverture. Un capteur accomplissant la tâche détection consomme de l'énergie pour acquérir et générer des données. La source d'énergie des nœuds étant limitée, celle-ci doit être minutieusement contrôlée pour que la durée de vie désirée puisse être atteinte. Les nœuds disposent souvent d'un module de contrôle de leur unité d'acquisition, qui leur permet d'activer ou de désactiver leur unité d'acquisition pour bien

gérer leur source d'énergie.

Dépendant des applications, la couverture peut être étudiée avant le déploiement des capteurs dans une zone. Dans le contexte du déploiement déterministe, l'étude de la couverture permet de minimiser le nombre ou le coût des nœuds à déployer. Tandis que pour le déploiement aléatoire, l'étude de la couverture permet de déterminer la densité minimale requise pour satisfaire les objectifs de couverture, en rapport avec l'application considérée. Considérant la nature hétérogène des équipements composant un RCSF (capteurs possédant différents rayons de détection ou autres), la couverture permet de mettre en évidence les capacités de chaque nœud pour maximiser la qualité de service fournie. La gestion de la couverture dans un réseau doit également prendre en compte d'autres contraintes telles que la connectivité des nœuds qui est une issue aussi importante que la couverture.

En outre, les techniques proposées pour la gestion de la couverture dans les RCSFs, doivent s'adapter aux topologies dynamiques des RCSFs, au passage à l'échelle du nombre de nœuds dans le réseau et à toute autre contrainte influençant la conception des RCSFs.

3.2 Problèmes de couverture dans les RCSFs

Les issues de couverture sont nombreuses. Cette section tente de formuler de manière non exhaustive l'essentiel des problèmes de couverture adressés dans la littérature et en particulier, les issues sur lesquelles notre étude sur la couverture sera basée.

3.2.1 Types de couverture

Le type de couverture se réfère à l'objet d'étude. Cardei et al. [3] ont tenté de classifier les différents problèmes de couverture, en se basant sur l'objet d'étude, en trois types : la couverture de surface (ou couverture de zone), la couverture de cibles (couverture par point) et la couverture de barrière. On parle de couverture de surface lorsque l'objectif de la couverture c'est de surveiller une zone entière. Celle-ci peut constituer une surface plane ou un espace à trois dimensions. La couverture de cibles qui est le thème de notre étude, se réfère à la couverture dont l'objet d'étude constitue un ensemble de points discrets appelés cibles, se trouvant dans l'espace considéré. Enfin pour la couverture de barrière, l'objectif c'est de construire une barrière de nœuds capteurs de manière à minimiser la probabilité d'intrusion d'un élément à travers la barrière construite.

3.2.2 Déploiement et couverture

Un déploiement peut être dense ou non dépendant de l'application considérée. Généralement un déploiement dense est exigé dans les environ-

nements inaccessibles, où disperser les nœuds dans la zone constitue la seule alternative au placement déterministe des nœuds. Pour la couverture de cibles, un déploiement aléatoire consiste à disperser plusieurs nœuds autour de chaque cible augmentant ainsi la probabilité de couverture de chaque cible dans la zone (applications militaires).

Un déploiement déterministe pose le problème de l'optimisation du placement des nœuds dans la zone d'intérêt tel que les objectifs de la couverture soient satisfaits. Beaucoup de techniques ont été proposées dans la littérature. Celles-ci se basent souvent sur le modèle de couverture des nœuds et sur des techniques d'optimisation géométriques.

Le problème de la couverture peut être étudié par rapport à un déploiement dynamique. Un déploiement dynamique implique un redéploiement des nœuds dans la zone après le déploiement initial avec l'utilisation de nœuds capteurs mobiles.

3.2.3 Ordonnancement d'activité

L'ordonnancement d'activité se réfère au contrôle de l'activité des capteurs dans une zone d'intérêt, pour optimiser leur consommation d'énergie tout en maintenant une certaine qualité de couverture. Dans les environnements où les nœuds sont déployés de manière très dense, le nombre de nœuds est souvent supérieur à l'optimum nécessaire. C'est le cas des applications de couverture de zone et de couverture de cibles dans certains environnements (milieux désastreux, champs militaires, etc,...). Les capteurs doivent fonctionner de manière autonome, pour couvrir des cibles constamment, pendant une certaine durée. L'énergie peut être efficacement gérée en alternant l'activité des nœuds afin de maximiser la durée de vie du réseau. Si les nœuds capteurs sont déployés en surnombre dans le champ, l'activation d'un sous-ensemble des nœuds permet d'atteindre les objectifs de couverture. Les algorithmes d'ordonnancement tentent souvent de maintenir un sous-ensemble des nœuds actif durant un certain temps avant d'en activer un autre. Pour la couverture de cibles, plusieurs nœuds sont susceptibles de couvrir les mêmes cibles et dans ce cas, les activer un à un successivement serait une meilleure solution que de les activer en même temps.

3.2.4 Caractéristiques des algorithmes de couverture

Une fois que le déploiement est effectué, le service de gestion de la couverture entame l'ordonnancement de l'activité des nœuds. L'algorithme de gestion de la couverture peut être centralisé ou distribué. Un algorithme est centralisé s'il est exécuté à la station de base et le résultat est transmis aux nœuds. Les algorithmes centralisés requièrent généralement la connaissance de la position de chaque nœud capteur dans le réseau. Une fois déployé, chaque nœud envoie ses données (coordonnées géographiques par GPS, et

identifiant) à la station de base. Celle-ci exécute l'algorithme et renvoie les résultats aux nœuds. Chaque capteur prend ainsi connaissance de son mode de fonctionnement dans le réseau. Les algorithmes de couverture centralisés ne sont applicables qu'aux configurations à échelle relativement petite et possèdent l'avantage de contourner les limitations en capacités de calcul des nœuds capteurs. À l'opposé les algorithmes distribués sont plus pratiques pour les architectures à large échelle. Les nœuds coopèrent localement par échange de messages pour prendre des décisions. Les algorithmes distribués exigent des nœuds une certaine capacité de calcul. Ils sont plus tolérants aux pannes que les algorithmes centralisés.

3.2.5 Couverture et hétérogénéité des nœuds

L'hétérogénéité se réfère au fait que certains nœuds capteurs dans un réseau peuvent disposer de plus de capacités (rayon de capture, rayons de communication, énergie...) que d'autres. Certains nœuds munis de locomoteurs sont capables de se déplacer dans la zone. Dans certains réseaux, les nœuds possèdent des rayons de capture différents. De ce fait, la portée de capture des nœuds est variée. Les nœuds disposant d'une plus grande portée (rayon de détection) peuvent couvrir un espace plus large que d'autres. Dans d'autres scénarios, les nœuds peuvent ajuster dynamiquement leurs rayons de capture pour contrôler les zones ou les cibles couvertes dans l'espace de la zone d'intérêt. Dans tous ces cas, la gestion de la couverture peut exploiter les aptitudes de chaque capteur pour augmenter la qualité de la couverture dans le réseau. Les capteurs mobiles permettent d'effectuer des tâches performantes dans un réseau telles que réparer les trous de couverture. Un trou de couverture consiste à un espace non couvert ou une cible non couverte et peut être lié au déploiement ou à une panne inattendue des nœuds dans un réseau. Concernant les réseaux disposant de nœuds mobiles, le problème souvent posé par la couverture c'est comment planifier la trajectoire des nœuds mobiles pour gérer efficacement l'énergie consommée par chaque déplacement.

3.2.6 Couverture et qualité de service

La qualité de service de la couverture est souvent définie en accord avec les objectifs d'une application donnée. Le concept de ratio de couverture permet d'évaluer la proportion d'espace dans le champs, couverte par tous les capteurs, par rapport à l'espace total du champs. Dans le contexte de la couverture de cibles, le ratio de couverture représente le nombre de cibles couvertes par tous les capteurs dans une zone, sur le nombre total de cibles total contenues dans la zone. Le ratio de couverture peut être défini en termes de pourcentage. Pour la couverture de zone, on dit que le ratio de couverture est de 100 % si tout point de la zone est sous la couverture d'au

moins un capteur. Dans ce cas la couverture est dite complète. De même que pour la couverture de cibles, certaines applications exigent une couverture complète de toutes les cibles qui se traduit par un ratio de couverture de 100%. On parle de couverture partielle lorsque toute la surface n'est pas couvert ou que toutes les cibles (dans le contexte de la couverture de cibles) de la zone ne sont pas couvertes. Ceci peut être du au fait que certaines cibles sont situées si proches que couvrir toutes les cibles en même temps peut conduire à une redondance dans les données reportées. Dans ce cas la couverture complète peut être compromise au bénéfice d'une maximisation de la durée de vie du réseau. Ainsi pour une couverture partielle, le ratio de couverture est inférieur à 100%.

D'autres applications requièrent une certaine robustesse qui se traduit par une haute qualité de service dans la couverture. La notion de degré de couverture permet de déterminer comment chaque point est couvert (ou chaque cible est couverte) dans la zone d'intérêt. Un point est k -couvert s'il est couvert par k ($k \geq 1$) nœuds capteurs dans la zone. Un point k -couvert peut tolérer $k - 1$ pannes de nœuds.

3.3 Modèles de couverture

Un modèle de couverture fournit une mesure de la couverture d'un capteur par rapport à une zone donnée ou certains points précis dans l'espace. Généralement cette mesure est obtenue en considérant la relation géométrique existante entre le capteur et l'ensemble des points de l'espace. Elle peut donc être exprimée par une fonction prenant en entrée l'angle et la distance euclidienne entre la position d'un capteur donné et un point de l'espace, et retournant en sortie la mesure de la couverture du capteur par rapport à ce point. En outre, compte tenu de la diversité des types de capteurs ainsi que les différents scénarios d'applications possibles, le modèle de couverture des capteurs peut être vu différemment. Plusieurs modèles de couverture ont été étudiés dans la littérature parmi lesquels : les modèles binaires dont la mesure de couverture prend soit la valeur 1 ou 0 ; le modèle de couverture général où la mesure de couverture est estimée dans l'ensemble des valeurs réelles de l'intervalle $[0, 1]$, incluant les modèles de couverture probabilistes et les modèles de couverture par estimation. Si l'angle n'est pas introduit dans les paramètres de la fonction de couverture, alors le modèle de couverture est omnidirectionnel. Et d'autre part si l'angle γ est introduit, alors le modèle de couverture est directionnel. Cette section introduit quelques modèles de couverture communément adoptés dans les réseaux de capteurs ainsi que leurs formulations mathématiques.

3.3.1 Modèles de couverture binaire

Modèle binaire de couverture par secteur

Le modèle de couverture binaire par secteur¹ est un modèle binaire dont la couverture est définie par rapport à l'angle visuel ω , l'angle d'orientation du nœud ϕ_s et au rayon de capture R_s . La fonction de couverture du modèle par secteur est donnée par l'équation 3.1.

$$f(d(s, z), \phi(s, z)) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(s, z) \leq R_s \text{ et } \phi_s \leq \phi(s, z) \leq \phi_s + \omega \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

$d(s, z)$ est la distance euclidienne entre un capteur s et un point cible z . $\phi(s, z)$ est l'angle selon la position du capteur s et celle du point z . L'équation 3.1 définit un secteur à l'intérieur duquel sont situés tous les points cibles couverts.

Modèle binaire de couverture circulaire

Le modèle de couverture binaire circulaire d'un capteur est un modèle binaire dont la couverture est définie par rapport au rayon de capture R_s et à la distance $d(s, z)$ séparant le capteur et un point cible. C'est le modèle le plus utilisé dans les études sur la couverture. La zone de couverture d'un capteur est définie par un cercle de rayon R_s dont le capteur est le centre ; tout point situé à l'intérieur de la surface du cercle est couvert, c'est-à-dire la mesure de la couverture est égale à 1. La fonction de couverture du modèle circulaire est donnée par l'équation 3.2.

$$f(d(s, z)) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(s, z) \leq R_s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

Modèle de couverture circulaire atténué

Le modèle binaire de couverture par circulaire atténué prend en compte la réduction de la qualité de la puissance de détection d'un nœud capteur par rapport à la distance. Cette réduction est valable pour certains types de capteurs (exemple : capteur d'ondes acoustiques ou sismiques) et pas pour d'autres. L'équation 3.3 donne un exemple de modèle de couverture atténué par disque.

$$f(d(s, z)) = \frac{C}{d^\alpha(s, z)} \quad (3.3)$$

α est le coefficient d'atténuation alors que C est une constante.

1. A l'image d'un capteur d'images muni d'une caméra directionnelle.

Modèle de couverture circulaire tronqué

Les travaux dans [28] et [29] ont introduit des modèles de couverture basés sur une approximation de la mesure de couverture pour une très longue distance séparant le nœud capteur et un point cible. En effet, dans le modèle de couverture atténué, la mesure de la couverture devient très faible quand la distance entre le capteur et le point cible devient très grand, en un tel point que la mesure de couverture peut être considérée comme négligeable au-delà d'une certaine distance. Zou et al. ont proposé dans [29] un modèle de couverture basé sur la fonction définie par l'équation 3.4.

$$f(d(s, z)) = \begin{cases} Ce^{-\alpha d(s, z)} & \text{si } d(s, z) \leq R_s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Avec α désignant les paramètres caractéristiques physiques du nœud capteur et R_s le rayon de détection [27]. Si plusieurs capteurs couvrent un point cible, la mesure de couverture est définie par la somme de l'ensemble des mesures de chaque capteur.

Chapitre 4

La couverture de cibles dans les RCSFs : état de l'art

Ce chapitre présente un état de l'art sur la couverture de cibles dans les réseaux de capteurs sans fil.

4.1 La couverture de cibles : objectifs et motivations

L'objectif général de la couverture de cibles c'est de couvrir un ensemble fini de points discrets dans une zone d'intérêt. Un nœud capteur dans un réseau est capable de couvrir l'ensemble des points cibles placés dans sa zone de couverture. Et afin de maximiser la couverture des cibles dans un réseau, un nombre plus ou moins important de capteurs doit être déployé. Selon l'application considérée, le déploiement des capteurs peut s'effectuer en adoptant un des modes de déploiement possibles dans les RCSFs. Cependant, chaque type de déploiement pose un objectif spécifique, auquel la gestion de la couverture de cibles tente de répondre. Dans le contexte du déploiement déterministe, le problème posé est celui de l'optimisation du placement des capteurs dans la zone d'intérêt, afin de satisfaire certains objectifs qui de manière générale, peuvent se résumer par la minimisation de la population ou du coût des capteurs à déployer. Lorsque les nœuds sont déployés aléatoirement dans une zone d'intérêt pour l'observation d'un ensemble de cibles, le problème fondamental est la gestion et le contrôle de la couverture dans le réseau, afin d'atteindre les objectifs fixés en termes de couverture et de durée de vie, et ce de manière autonome. La question de la couverture dans ce cas, se traduit par le contrôle de l'activité des capteurs dans le réseau, alors que celle de la durée de vie est étroitement liée à la gestion de l'énergie.

En outre, les objectifs de couverture sont souvent liés à l'application en question. Pour certaines applications, une couverture complète de toutes

les cibles n'est pas exigée. De ce fait, on peut choisir de ne pas couvrir certaines cibles, possédant une priorité inférieure par rapport aux autres, ou couvertes de manière redondante, pour maximiser davantage la durée de vie du RCSF.

Dépendant de la nature de l'application qui peut exiger une haute qualité de surveillance ou un certain degré de tolérance aux pannes, le problème de la couverture de cibles peut être étudié par rapport à la qualité de service qui peut se traduire par le problème de la k -couverture de cibles. Une cible est k -couverte si k nœuds assurent simultanément la couverture de cette cible. La k -couverture de cibles impose que chaque cible de la zone soit couverte par au moins k nœuds capteurs.

La couverture de cibles peut être étudiée par rapport à d'autres considérations. Celles-ci peuvent être liées à l'hétérogénéité des nœuds, à des problèmes de bande passante ou des objectifs spécifiques tels que la minimisation du nombre de nœuds capteurs à déployer ou l'optimisation du déplacements des nœuds mobiles dans le contexte des réseaux mobiles et hybrides. Dans les lignes qui suivent nous tenterons d'étudier la couverture dans un premier temps dans le contexte du déploiement déterministe, qui pose comme principal problème l'optimisation du placement des nœuds dans une zone d'intérêt, de manière à satisfaire les objectifs de couverture fixés. Ensuite nous allons passer en revue les différentes approches d'ordonnement dans le contexte de la couverture de cibles aléatoire, ainsi que les solutions proposées dans la littérature.

4.2 Optimisation du placement des nœuds

Étant donné un ensemble fini de sites disponibles dans une zone d'intérêt, l'objectif principal du déploiement déterministe se résume à trouver les emplacements optimaux parmi ces sites, où les capteurs seront placés, tels que le nombre de noeuds utilisé pour couvrir toutes les cibles soit minimisé, et que les objectifs de couverture soient satisfaits. Dans certains scénarios, différents types de capteurs sont utilisés, avec des coûts différents pour chaque type de capteur. Dans ce cas, l'objectif du déploiement prend en compte la minimisation du coût total des noeuds utilisés pour satisfaire les objectifs de couverture. Pour les capteurs directionnels, l'objectif revient souvent à optimiser l'orientation des capteurs afin de maximiser la couverture des cibles.

Beaucoup de techniques d'optimisation peuvent être utilisées pour modéliser et pour résoudre le problème d'optimisation du placement des noeuds. La programmation linéaire permet de formaliser la plupart des problèmes d'optimisation. Lorsque l'espace de solution n'est pas assez grand,

une recherche exhaustive de l'ensemble des placements possibles peut être effectuée afin de trouver l'optimum global. La complexité de la recherche exhaustive est définie par l'équation 4.1 :

$$C = \sum_{i=1}^I (I, i) = 2^I - 1 \quad (4.1)$$

I est le nombre de sites disponibles dans une zone de couverture donnée. Selon l'équation 4.1, la complexité de la recherche exhaustive augmente de manière exponentielle avec le nombre de sites disponibles. Des algorithmes d'approximation gloutons [30, 31, 32, 33, 34], génétiques [35, 36, 37, 38] et autres techniques d'approximation ont été proposées pour résoudre efficacement le problème lorsque l'espace de solution devient plus grand. Les solutions d'approximation permettent de contourner les limites en termes de complexité des solutions optimales, en proposant des solutions sous-optimales pouvant résoudre efficacement et en un temps raisonnable le problème de l'optimisation du placement des noeuds.

4.2.1 Modélisation du problème

Considérons A types de noeuds capteurs avec chacun un coût c_a et un rayon de couverture égal à r_a , avec $a = 1, \dots, A$. On suppose que plus le rayon de couverture est grand, plus le coût est important. Soit $D_a(i)$ l'ensemble des cibles pouvant être couvertes par un type de noeud a placé au site i . $D_a(i)$ est défini par :

$$D_a(i) = \{j/d(i, j) \leq r_a\}, i = 1, \dots, I$$

Avec $d(i, j)$ désignant la distance euclidienne entre un noeud i et une cible j . Une fonction booléenne x_i^a est définie tel que $x_i^a = 1$ si un noeud de type a est placé à la position i , et $x_i^a = 0$ sinon. Le problème de l'optimisation du placement des noeuds peut être formalisé par une programmation linéaire d'entier définie par :

$$\text{Minimiser : } \sum_{i=1}^I \sum_{a=1}^A c_a x_i^a, \quad (4.2)$$

$$\text{Contraintes : } \sum_{a=1}^A \sum_{j \in D_a(i)} x_i^a \geq k, i = 1, \dots, I \quad (4.3)$$

$$\sum_{a=1}^A x_i^a \leq 1 \quad (4.4)$$

L'objectif du problème c'est de minimiser le cout et le nombre de noeuds utilisés pour satisfaire la couverture. Etant donné que certaines applications

exigent une certaine robustesse dans la couverture se traduisant par une k -couverture, la première contrainte permet de garantir que chaque cible soit couverte par au moins k ($k \geq 1$) capteurs. La couverture des cibles par au moins un capteur est un cas particulier de la k -couverture. La deuxième contrainte garantit que chaque emplacement ne peut contenir qu'au plus un seul capteur.

Le modèle mathématique proposé dans les équations 4.2 - 4.4 présente une formulation basique du problème de l'optimisation du placement des noeuds. Beaucoup de variantes [33, 34, 39, 40, 41] de cette formulation ont été proposées, dépendant des considérations du problème posé. Certains travaux posent le problème de la maximisation du nombre de cibles couvertes étant donné un nombre N de capteurs ou de sites disponibles, ou la minimisation du coût total du réseau tout en garantissant un ratio de couverture donné.

4.3 Couverture de cibles : approches centralisées

Dans le contexte du déploiement aléatoire, les noeuds sont souvent dispersés en surnombre dans une zone d'intérêt pour surveiller un ensemble de cibles (points discrets) dans la surface. Généralement le scénario de déploiement est tel que plusieurs noeuds sont dispersés autour de chaque cible. Une cible est susceptible d'être couverte par plusieurs noeuds simultanément. Une couverture de toutes les cibles est garantie si tous les noeuds sont activés en même temps. Cependant activer tous les noeuds ne serait pas une solution efficace à la gestion de l'énergie. Partitionner les noeuds en plusieurs sous-ensembles à activer successivement est une approche plus efficace au problème de la gestion de l'énergie. L'approche des ensembles couvrants consiste à partitionner la population des noeuds en plusieurs sous-ensembles appelés ensembles couvrants. Chaque ensemble couvrant actif permet de couvrir toutes les cibles et peut prendre en compte d'autres critères à satisfaire. Les ensembles couvrants sont activés successivement et seuls les noeuds appartenant à un ensemble activé restent actifs. Les autres noeuds éteignent leur module de détection, et entrent en mode veille.

Dépendant des contraintes considérées dans la réalisation d'une application, le problème des ensembles couvrants est formulé dans beaucoup de cas, comme un problème d'optimisation. Beaucoup de travaux concernant la couverture de cibles aléatoire se sont focalisés sur le problème de la maximisation de la durée de vie des RCSFs en conjonction avec l'approche des ensembles couvrants. Dans ce cas le problème revient à calculer un nombre optimal d'ensembles couvrants pour étendre la durée de vie du réseau au maximum. Ce problème a été démontré Np-complet. Plusieurs solutions d'ordonnement sous-optimales ont été proposées dans la littérature, basées sur les techniques de la programmation linéaire, les heuristiques et algo-

rithmes gloutons et autres techniques d'optimisation. Les algorithmes proposés procèdent souvent par une sélection itérative des nœuds capteurs, pour former les ensembles couvrants. Une stratégie rigoureuse de sélection des capteurs doit être menée pour minimiser le nombre de capteurs dans chaque ensemble couvrant. Les solutions s'exécutent souvent en plusieurs itérations et à chaque itération, les nœuds présentant les profits maximaux sont sélectionnés pour couvrir les cibles critiques. Les cibles critiques sont les cibles qui à l'issue du déploiement, sont les moins couvertes en termes de nombre de capteurs et/ou de leur quantité d'énergie restante. Le profit maximal d'un nœud peut être lié au nombre de cibles non encore couvertes qu'il peut couvrir et à la quantité d'énergie restante pour ces nœuds. Dans les lignes qui suivent, nous introduirons différentes approches d'ensembles couvrants discutées dans la littérature ainsi que les différents travaux les ayant introduits.

4.3.1 Ensembles couvrants disjoints

Dans l'approche des ensembles disjoints les nœuds sont partitionnés en plusieurs ensembles couvrants disjoints à activer successivement. Deux ensembles C_k et $C_{k'}$ sont disjoints si leur intersection est vide ($C_k \cap C_{k'} = \phi$) avec $k \neq k'$. Le problème de la maximisation de la durée de vie des RCSFs conjointement avec les ensembles couvrants disjoints a été largement discuté dans la littérature. Il consiste à trouver un nombre maximal d'ensembles couvrants disjoints, tel que chaque ensemble couvrant satisfait les objectifs de couverture définis. Supposons que les contraintes soient de satisfaire une couverture complète des cibles et de maximiser la durée de vie du réseau, le problème pourrait être adressé comme suit :

Définition : Étant donné un ensemble de nœuds N et un ensemble de cibles T aléatoirement déployés dans une zone, ainsi que la relation de couverture initialement obtenue entre les nœuds et les cibles (nœud s_i couvre la cible t_j). Le problème de la maximisation de la durée de vie du réseau par l'approche des ensembles couvrants disjoints consiste à trouver un nombre maximal d'ensembles couvrants C_k , avec $k = 1, \dots, K$ tel que chaque ensemble couvrant puisse couvrir toutes les cibles et que les ensembles soient disjoints ($C_k \cap C_{k'} = \phi$). Dans ce cas, un nœud n'appartient qu'à un seul ensemble couvrant. Si tous les nœuds possèdent la même quantité initiale d'énergie et un même taux de consommation d'énergie à l'état actif, alors tous les nœuds d'un ensemble s'épuiseront en même temps. Chaque ensemble est activé jusqu'à l'épuisement de ses nœuds avant d'en activer d'autres.

Protocoles proposés La solution centralisée proposée par Slijepcevic et Potkonjak [42] dans le contexte de la couverture de surface peut être adaptée au contexte de la couverture de cibles. La notion de champ introduite dans

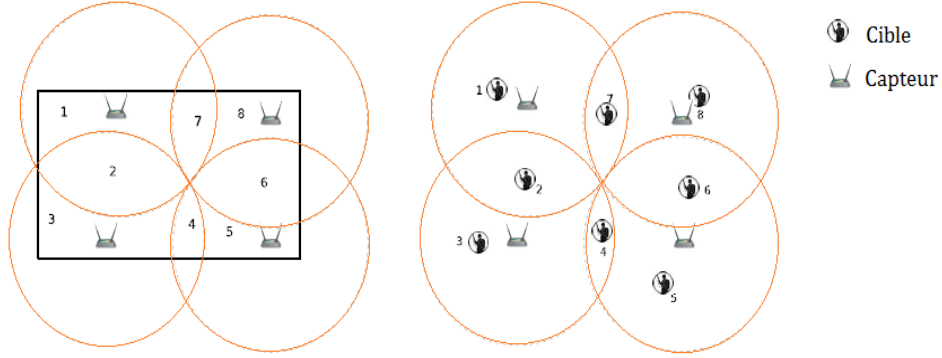


FIGURE 4.1 – Relation entre couverture de surface et couverture de cibles.

[42] établit que deux points appartiennent à un même champ s'ils sont couverts par le même sous-ensemble de nœuds. En remplaçant chaque champ par un point, le problème de la couverture d'espace devient équivalent à celui de la couverture de cibles (figure 4.1). Un algorithme tentant de produire un nombre maximal d'ensembles couvrants disjoints est proposé. Celui-ci sélectionne itérativement le nœud présentant un profit maximal et couvrant l'élément critique, jusqu'à constituer un ensemble. L'élément critique est la cible la moins couverte par les capteurs disponibles à un moment donné, et le capteur au profit maximal représente le capteur couvrant plus de cibles. Une fois qu'un ensemble couvrant est formé, tous les capteurs déjà sélectionnés sont exclus de l'ensemble des nœuds disponibles, pour construire de nouveaux ensembles disjoints. la complexité de l'algorithme est de $O(n^2)$, avec n le nombre de nœuds.

Cardei et Du [43] ont adressé le problème des ensembles couvrants disjoints, initialement posé par Slijepcevic et Potkonjak [42]. Le problème est transformé en un problème de flot maximal dans un graphe, obtenu par construction à partir d'un graphe biparti. Le graphe biparti représente la relation de couverture initiale entre nœuds et cibles. Le problème de flot maximal est résolu par une programmation d'entier et le résultat du flot maximal obtenu détermine le nombre final d'ensembles couvrants possibles. Les résultats montrent des performances meilleures par rapport au nombre d'ensembles disjoints calculés par Slijepcevic et Potkonjak [42], cependant au prix d'une augmentation en complexité de calcul non négligeable.

4.3.2 Ensembles couvrants non-disjoints

Pour les ensembles couvrants non-disjoints, les nœuds sont partitionnés en plusieurs sous-ensembles couvrants non-disjoints à activer successivement pour étendre la durée de vie du réseau. Deux sous-ensembles C_k et $C_{k'}$ sont non-disjoints si leur intersection est non vide ($C_k \cap C_{k'} \neq \phi$) avec

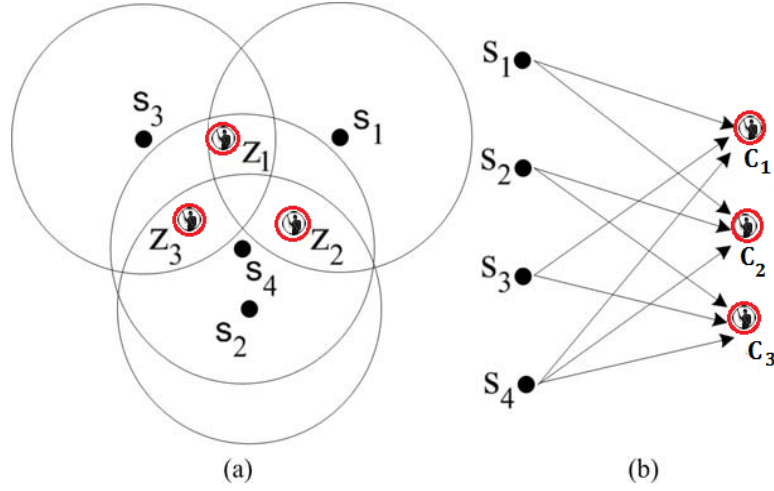


FIGURE 4.2 – Ensemble couvrants disjoints et non disjoints.

$k \neq k'$. Dans ce cas un nœud peut appartenir à plusieurs ensembles couvrants sous contrainte de sa disponibilité en énergie. Les ensembles couvrants non-disjoints permettent d'étendre mieux la durée de vie du réseau, comparés aux ensembles couvrants disjoints. L'exemple introduit par Cardei et al.[44] en donne une bonne illustration. En supposant que tous les nœuds possèdent une quantité d'énergie égale à 1, la figure 4.2 montre que l'approche des ensembles couvrants disjoints partitionne les nœuds en deux sous-ensembles disjoints $\{s_1, s_2\}$ et $\{s_3, s_4\}$. La durée de vie obtenue est donc de 2. Si les nœuds sont partitionnés en ensembles couvrants non-disjoints, alors quatre ensembles sont constitués : $\{s_1, s_2\}$, $\{s_2, s_3\}$, $\{s_1, s_3\}$ et $\{s_4\}$. Chaque capteur opère un temps égal à sa quantité d'énergie sur le nombre d'ensembles auxquels il participe. La durée de vie obtenue est de 2.5, soit 25% d'augmentation. Le temps d'activation de chaque ensemble couvrant est proportionnel au minimum des quantités d'énergie des capteurs de l'ensemble. L'espace de solution des ensembles couvrants disjoints est inclus dans celui des ensembles couvrants non-disjoints.

Protocoles proposés Cardei et al. [44] ont étendu les travaux dans [43] en introduisant le problème des ensembles couvrants non-disjoints dans le contexte de la maximisation de la durée de vie des RCSFs. Ils ont modélisé le problème par une programmation linéaire. Deux solutions ont été proposées pour résoudre le problème. La première est basée sur la programmation linéaire et présente une grande complexité ($O(m^3n^3)$, avec m le nombre d'ensembles couvrants et n le nombre de nœuds). La deuxième solution est sous forme d'un algorithme glouton de complexité $O(dk^2n)$, avec d le nombre de nœuds couvrant l'élément critique, k le nombre de cibles et n le nombre total de nœuds. L'algorithme construit itérativement une partition

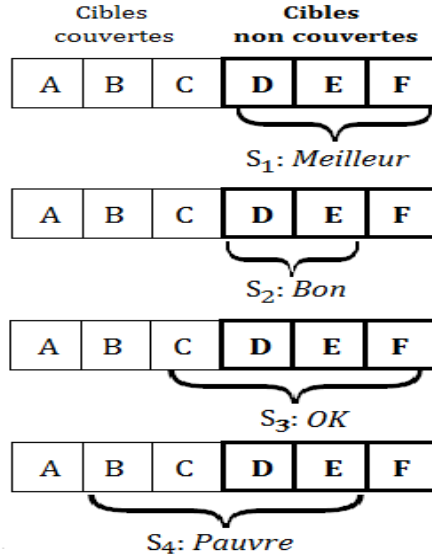


FIGURE 4.3 – Les quatre classes de nœuds candidats.

d'ensembles couvrants en sélectionnant à chaque itération le nœud au profit maximal pour couvrir la cible critique. La cible critique est définie comme la cible la moins couverte en termes de nombre de nœuds couvrant la cible et du résidu d'énergie de ces nœuds. Un nœud est supposé disposer d'un grand profit s'il couvre un plus grand nombre de cibles non encore couvertes tout en détenant un résidu d'énergie supérieur aux autres. A chaque fois qu'un ensemble couvrant est constitué, le temps d'activation de tous les nœuds est ajusté et la quantité d'énergie de chaque nœud est mise à jour. Une liste des nœuds détenant une quantité d'énergie non nulle est maintenue afin de former d'autres ensembles couvrants. Chaque nœud participe à plusieurs ensembles et la somme de l'énergie consommée par un nœud dans tous les ensembles n'excède pas sa quantité d'énergie initiale.

Zorbas et al. [45, 46] ont tenté d'améliorer les solutions proposées dans [42, 44] en introduisant une classification des capteurs par rapport à leur statut de couverture. Lors de la constitution des ensembles couvrants, on distingue quatre types de nœuds candidats dont chaque type est défini par rapport au nombre de cibles déjà couvertes. Les quatre types de candidats sont : *meilleur*, *bon*, *OK* et *pauvre* comme le montre la figure 4.3. Les candidats des deux premiers types présentent un profit meilleur que les deux autres mais ils sont plus petit en nombre. Les nœuds candidats sont sélectionnés en tenant compte du statut de couverture, de leur association avec les cibles les moins couvertes (en calculant un attribut pour chaque nœud) et de la quantité d'énergie restante pour chaque nœud. La cible critique est déterminée en calculant au début de l'algorithme un attribut pour

tous les nœuds couvrant chaque cible. L'attribut calculé pour chaque nœud tient compte du niveau de *criticité*¹ de chaque cible couverte par le nœud. L'attribut est défini dans l'équation 4.5.

$$B_j = \sum_{i=1}^{|P_j|} (\mu - |N_i| + 1)^3 \quad (4.5)$$

Considérant l'équation 4.5 les nœuds possédant les attributs faibles sont prioritaires par rapport aux autres. N_i contient l'ensemble des nœuds couvrant la cible t_i , P_j contient les cibles couvertes par le nœud s_j , tandis que $\mu = \max(|N_1|, \dots, |N_k|)$, avec $k = |T_0|$. La complexité de l'approche est de $O(wn^2k)$, avec w représentant le nombre de fois qu'un nœud peut appartenir aux ensembles couvrants constitués. Les résultats de simulation montrent des performances très proches de l'optimal. Concernant le temps d'exécution, la solution de Zorbas et al.[45] présente également des performances meilleures par rapport à celle de Slijepcevic & Potkonjak[42] et à l'heuristique gloutonne de Cardei et al.[44]. Ceci est dû au fait que la cible critique est déterminée à l'aide de l'attribut calculé pour chaque nœud une seule fois au début de l'algorithme.

4.3.3 Ensembles couvrants connectés

L'approche des ensembles couvrants disjoints et non-disjoints sans la contrainte de la connectivité n'est applicable qu'aux réseaux utilisant le modèle de communication directe. C'est-à-dire tous les nœuds du réseau envoient les données de détection vers la station de base par une liaison directe (un seul saut de communication). Dans d'autres réseaux, la communication est telle que les nœuds sont connectés à la station de base par l'intermédiaire de nœuds relais. Les ensembles couvrants calculés doivent prendre en compte la gestion de la connectivité parallèlement à la gestion de la couverture de cibles. Dans ce cas, les nœuds peuvent assurer des rôles différents dans la gestion de la couverture. Les nœuds qui capturent les données et les envoient à la station de base sont des nœuds sources, alors que les nœuds utilisés comme relais pour acheminer les données vers la station de base sont des nœuds relais. L'exemple de la figure 4.4 illustre le problème de la couverture associé à la gestion de la connectivité. Le scénario est tel que : 13 nœuds sont aléatoirement déployés dans une zone d'intérêt pour couvrir 4 cibles et transmettre les données de détection vers la station de base. Les cercles pleins indiquent les nœuds pouvant couvrir une ou plusieurs cibles tandis que les cercles pointillés indiquent les autres nœuds du réseau. Dans la figure 4.4 (a) seul trois nœuds (s_7, s_9, s_{10}) actifs peuvent couvrir toutes les cibles et les deux autres nœuds sont utilisés comme des nœuds relais. Un autre sous-ensemble de nœuds (s_3, s_4, s_5, s_6) permet de couvrir toutes les cibles

1. Le nombre de capteurs couvrant cette cible.

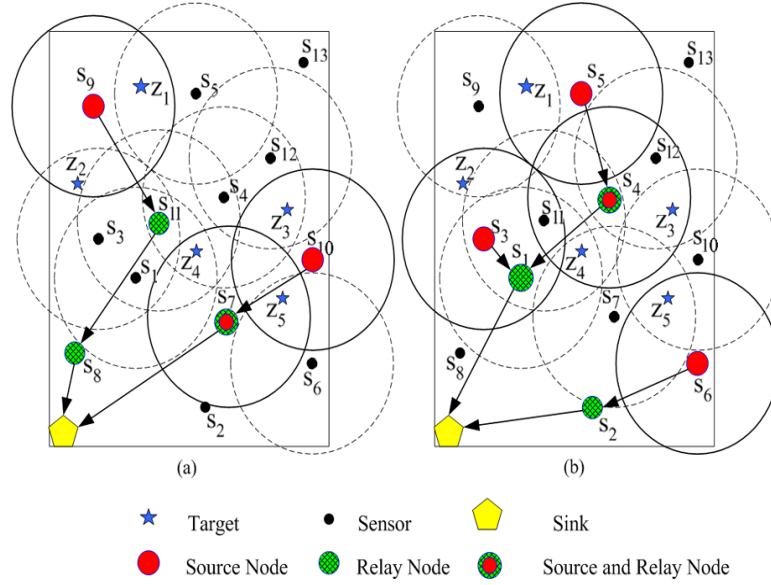


FIGURE 4.4 – Illustration des ensembles couvrants connectés.

et de router les données vers la station de base en utilisant s_1, s_2, s_4 comme nœuds relais. L'approche des ensembles couvrants connectés, associée au problème de la maximisation de la durée de vie des RCSFs pose le problème de trouver le nombre maximal d'ensembles couvrants connectés ainsi que leurs temps d'opérations respectifs tel que chaque ensemble satisfait la couverture et la connectivité. Ce problème est Np-complet [47]. Des solutions sous-optimales sous formes de heuristiques et algorithmes d'approximation ont été proposées. La consommation d'énergie des nœuds est influencée par les fonctions que remplit chaque nœud dans un ensemble. Les nœuds relais consomment moins d'énergie que les nœuds sources du fait qu'ils n'activent que leurs unités de communication. Ils consomment l'énergie pour recevoir et envoyer des données. Les nœuds sources consomment de l'énergie pour détecter des données et les envoyer aux nœuds relais. A la fois leurs unités de communication et de détection sont activées.

Protocoles proposés Les travaux de Cardei et al. [48] et Jaggi & Abouzeid [49] considèrent un modèle de consommation d'énergie simplifié où la quantité d'énergie consommée par chaque nœud pour la communication est prédéfinie. Cardei et al.[48] ont proposé deux algorithmes (centralisé et distribué) pour calculer des ensembles couvrants connectés. Un algorithme de recherche en largeur de graphe est utilisé dans la version centralisée pour déterminer le chemin menant à la station de base. Tandis que pour l'approche décentralisée un arbre étendu minimal est utilisé pour déterminer les ensembles couvrants. Jaggi & Abouzeid[49] ont proposé une autre ap-

proche de génération d'ensemble couvrants connectés sous la contrainte de la maximisation de la durée de vie du réseau. Dans leur approche, ils conçoivent que les ensembles couvrants sont disjoints et l'objectif c'est de maximiser le nombre d'ensembles couvrants connectés. Les nœuds relais sont sélectionnés par l'algorithme du plus court chemin pour garantir la connectivité du réseau.

Dans d'autres scénarios, le modèle de consommation d'énergie tient compte de considérations diverses afin de produire des résultats plus réalistes. L'énergie consommée par les nœuds pour la communication est souvent dépendante de la distance entre les nœuds ou du nombre de cibles couvertes. Zhao et Gurusamy [47] ont adressé le problème des ensembles couvrants connectés sous la contrainte de la maximisation de la durée de vie du réseau. Un modèle de consommation d'énergie basé sur la distance a été considéré. Pour modéliser le problème, la notion d'arbre couvrant a été définie. Un arbre couvrant est défini comme un ensemble couvrant possédant la structure d'un arbre, dont les feuilles sont les nœuds sources et la racine est représentée par le puits (station de base). Chaque cible dans la zone est reliée à au moins un nœud de l'arbre pour garantir une couverture complète. Après avoir démontré que le problème de trouver K arbres couvrants satisfaisant la couverture et la connectivité est un problème Np-complet, une heuristique gloutonne constituée de trois phases a été proposée pour résoudre le problème adressé. Durant la première phase de l'algorithme, un poids $w_{ii'}$ est assigné à chaque lien existant entre deux nœuds i et i' , reflétant à la fois la consommation d'énergie associée à la communication pour ce lien, et l'énergie restante du nœud émetteur. Un arbre de communication de poids minimal est construit en connectant tous les nœuds, tel que la somme des poids des liens pour chaque nœud vers le puits soit minimale. Dans la deuxième phase, une méthode gloutonne est utilisée pour choisir les sources jusqu'à ce toutes les cibles soient couvertes. A chaque nœud est assignée une valeur de profit et le nœud au profit maximal est successivement choisi. La fonction de profit est donnée par l'équation 4.6 :

$$W(s) \equiv \frac{|Z_s - Z_s \cap Z'|}{w_s} \quad (4.6)$$

Avec $|Z_s - Z_s \cap Z'|$ représentant le nombre de cibles non couvertes pouvant être couvertes par S , et w_s le poids du chemin du nœud S jusqu'au puits. Enfin un ensemble couvrant est extrait de l'arbre couvrant durant la troisième phase, en tenant compte des nœuds sources déjà sélectionnés.

4.4 Couverture de cibles : approche localisée

Les algorithmes sur les ensembles couvrants introduits dans la section précédente sont centralisés en ce sens qu'ils sont exécutés à la station de

base et les résultats sont transmis aux nœuds. Le problème de l'ordonnement distribué dans le contexte de la couverture de cibles implique que les ensembles couvrants soient formés selon une approche localisée. Un nœud prend la décision d'alterner son état en se basant sur des informations locales, c'est-à-dire échangées avec les nœuds se trouvant dans son voisinage (un ou deux sauts de communication). La synchronisation des nœuds est une issue importante du fait qu'elle rend possible une simultanéité des décisions prises par les différents nœuds du réseau. Généralement le processus est divisé en plusieurs rounds et au début de chaque round, chaque nœud décide de son état (actif ou inactif) en se basant sur les informations échangées avec ses voisins. Ces informations contiennent le plus souvent le nombre de cibles couvertes et l'identifiant des nœuds. Très souvent le nœud présentant un profit maximal est sélectionné actif à chaque début de round. Ce nœud peut être déterminé après une évaluation par une fonction complexe basée sur les données reçues par chaque nœud, et le nœud présentant le profit maximal est sélectionné actif. Parallèlement, un nœud peut décider d'entrer en mode inactif pendant aussi longtemps qu'il vérifie que ses voisins actifs couvrent ses propres cibles. Également à chaque fois qu'une décision a été prise, le nœud en informe ses voisins en émettant un message de diffusion. Si deux ou plusieurs nœuds voisins obtiennent après évaluation les mêmes valeurs de profit, une brèche de couverture ou une redondance peut apparaître. Ce phénomène peut être évité par l'utilisation de schémas de *back-off*. Par exemple chaque nœud maintient un temporisateur, dont la valeur dépend du nombre de cibles qu'il couvre parmi celles non encore couvertes et de sa quantité résiduelle d'énergie. À l'expiration de ce temps, le nœud entre en mode actif évitant les trous de couverture [45, 50, 51, 52, 53, 54]

4.5 Couverture de cibles et rayons de détection ajustables

Les travaux présentés dans [55, 56] adressent le problème de la couverture de cibles où les nœuds peuvent ajuster dynamiquement leurs rayons de détection. Un nœud possédant un rayon de détection ajustable peut contrôler celui-ci à une valeur optimale nécessaire pour satisfaire la couverture des cibles dans son voisinage. Un nœud peut donc choisir d'augmenter son rayon soit pour couvrir davantage de cibles, ou le diminuer au cas où il en déjà couvert assez. De ce fait, l'ajustement de la portée des nœuds appliqué conjointement avec l'ordonnement des nœuds par l'approche des ensembles couvrants, permet de réduire de manière remarquable la consommation d'énergie dans tout le réseau, comparé au cas où chaque nœud possède un rayon de capture fixe. La figure 4.5 illustre un réseau dont les nœuds disposent de rayons ajustables.

Cardei et al. [55] ont proposé une extension de leurs travaux dans [44]

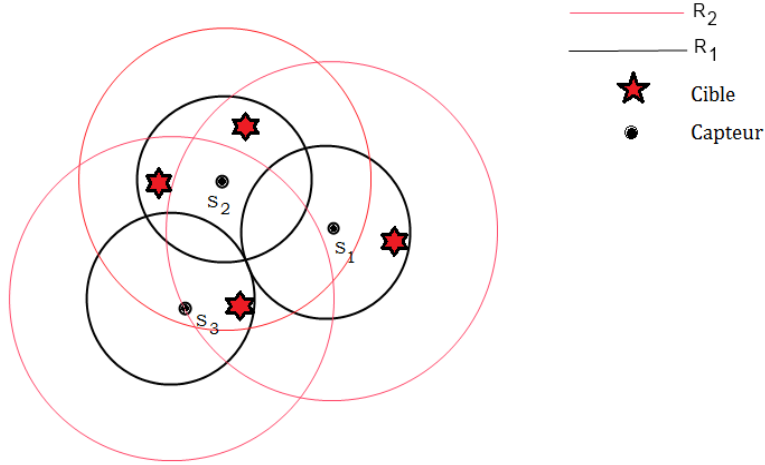


FIGURE 4.5 – Couverture de cibles et noeuds aux rayons ajustables.

en considérant des noeuds aux rayons de détection ajustables. Le problème adressé consiste à trouver un nombre maximal d'ensembles couvrants ainsi que la portée minimale associée à chaque nœud, tel que chaque ensemble garantisse une couverture complète des cibles. Trois heuristiques ont été proposées pour résoudre le problème. La première est basée sur la programmation linéaire. La deuxième est une heuristique centralisée basée sur un algorithme glouton pour constituer des ensembles couvrants. Initialement la portée de tous les nœuds est initialisée à 0, et des ensembles couvrants sont formés successivement à chaque itération, en privilégiant les nœuds ayant une plus grande contribution. La contribution d'un nœud est définie comme le rapport entre le nombre de cibles non couvertes par un nœud i avec un rayon de détection donné r_p , et la quantité d'énergie associée. La troisième solution proposée est distribuée, et s'exécute en plusieurs rounds au cours desquels, chaque nœud maintient un temps d'attente w_i dépendant de sa contribution avant de décider de son statut. Lorsqu'un nœud reçoit un message de ses voisins, il met à jour la liste des cibles qu'il peut couvrir, ajuste sa portée à la valeur minimale nécessaire pour couvrir la liste des cibles, met à jour sa contribution avant d'ajuster son temps d'attente. A la fin de son temps d'attente, le nœud émet un message de diffusion contenant les nœuds qu'il couvre. Lorsque la liste des cibles qu'un nœud peut couvrir est vide, alors il émet un message de diffusion annonçant sa décision d'entrer en mode inactif. Selon les résultats de simulation, l'énergie consommée peut être réduite de moitié comparée à l'approche où le rayon de détection des capteurs est fixe.

Dans [57], Lu et al. adressent le problème du maintien de la connectivité et de la couverture par ajustement de la portée des nœuds, comme une extension des travaux dans [55]. Un protocole distribué a été proposé pour

résoudre le problème. Il est constitué de deux phases : une phase d'initialisation de la connectivité et une autre phase pour garantir la couverture. Durant la phase d'initialisation de la connectivité, chaque nœud applique une règle d'éligibilité pour déterminer son statut (actif ou inactif). Un nœud i entre en mode inactif si les nœuds de son voisinage sont connectés et que ses cibles voisines² sont couvertes par ses capteurs voisins³. La règle d'éligibilité est exécutée par chaque nœud jusqu'à former une dorsale de communication où tous les nœuds (appelés dominateurs) gardent une portée minimale. Les autres nœuds sont dits dominés. Après la phase d'initialisation, la seconde phase est entamée pour garantir la couverture où nœuds dominateurs et dominés ajustent itérativement leurs rayons de détection en se basant sur leurs contributions (le ratio du nombre de cibles non couvertes sur la quantité d'énergie pour un rayon de détection donné) jusqu'à ce que toutes les cibles soient couvertes. Chaque nœud temporise durant un temps inversement proportionnel à sa contribution maximale. Si le nœud reçoit un message de ses voisins avant l'épuisement de son temps, il recalcule sa contribution et ajuste son temps d'attente. S'il épuise son temps d'attente avant de recevoir un message de ses voisins, le nœud émet un message de diffusion contenant sa contribution et l'ensemble des cibles couvertes, et entre en mode actif.

4.6 Couverture de cibles partielle

Pour certaines applications, une couverture complète de toutes les cibles peut constituer un objectif très strict. Ceci peut être dû au fait que certaines cibles sont assez proches pour être couvertes simultanément par les mêmes nœuds dans un ensemble couvrant. Dans ce cas, diminuer la restriction de la couverture complète s'avère nécessaire, pour éviter des redondances dans la détection des données, impliquant une perte d'énergie inutile. Certaines cibles ne seront pas couvertes dans certains ensembles : on parle de couverture partielle. Une couverture partielle est moins stricte qu'une couverture complète et présente un ratio inférieur à 100%. Dépendant des applications, le problème de la couverture partielle peut être formulé différemment, en tenant compte d'objectifs différents. Généralement, les problèmes adressés dans la littérature se focalisent plus sur la maximisation du ratio de couverture, ou sur la minimisation du nombre de cibles non couvertes. Abrams et al. [50] ont proposé une solution simple consommant moins de ressources que l'optimal pour résoudre le problème. Bien que la solution fut proposée dans le contexte de la couverture de surface, elle permet de résoudre efficacement le problème de la couverture de cibles partielle. La solution garantit une performance remarquable avec une approximation de $1 - 1/e$ de la solution optimale. Elle procède par assignation de chaque nœud à un ensemble C_k

2. L'ensemble des cibles couvertes par le capteur en question.

3. Capteurs avec qui il peut communiquer.

de manière aléatoire suivant une distribution uniforme. Plus précisément, un noeud choisit une valeur k entre 1 et K (le nombre d'ensembles à constituer) et s'assigne à C_k . Un autre algorithme glouton a été proposé dans [50] où K ensembles couvrants (C_1, \dots, C_K) sont initialement vides. L'algorithme assigne un noeud à un ensemble s'il maximise la somme cumulative de cibles non couvertes. Chaque noeud est assigné à un ensemble où il couvre le plus grand nombre de cibles non couvertes. Et à chaque cible est assigné un poids dépendant de sa probabilité d'être couverte durant les futures itérations. Les ensembles couvrants garantissent une couverture d'au moins 72% de l'espace. Zorbas et al. ont introduit dans [58] le problème de la couverture partielle prenant en compte la connectivité. Deux cibles voisines ne sont pas couvertes en même temps dans un même ensemble couvrant, supposant qu'elles sont susceptibles de fournir les mêmes données de détection. La décision de ne pas couvrir deux ou plusieurs cibles en même temps dans un ensemble couvrant, est prise en fonction du paramètre de la distance euclidienne entre les différentes cibles. Le nombre de cibles à couvrir dans chaque ensemble couvrant peut être spécifié au début. L'algorithme est centralisé et a été comparé à l'approche de la couverture complète introduite dans [47] par Zhao et Gurusamy. Les simulations estiment une double augmentation dans la durée de vie avec 90% des cibles couvertes.

4.7 Couverture de cibles et bande passante

Dans les applications où la surveillance des cibles doit être permanente, les données doivent être reportées à la station de base selon une fréquence prédéfinie. Un retard dans le report des données conduit à une perte d'informations. Dans beaucoup de cas, un nombre fixe de canaux sont disponibles pour transmettre les données vers la station de base. Certains protocoles tels que le TDMA divisent le canal en plusieurs créneaux représentant les sous-canaux disponibles. Chaque sous-canal définit une quantité maximale de bits de données que chaque noeud actif peut transmettre vers la station de base, via ce sous-canal. Dans ce cas, les noeuds constitués dans les ensembles couvrants ne peuvent pas transmettre une quantité de données supérieure à celle assignée par le protocole de répartition des ressources du canal. La quantité de données transmise par chaque ensemble couvrant est limitée. Par exemple un noeud couvrant deux cibles doit transmettre deux fois les paquets d'un noeud couvrant une cible. Par conséquent les ensembles couvrants sont contraints par la bande passante [59]. Si chaque noeud génère une quantité fixe de données, la contrainte de bande passante peut conduire à des cibles non couvertes dans les ensembles couvrants. On parle de brèche de couverture. L'objectif souvent adressé dans ce contexte c'est la minimisation des brèches de couverture dans les réseaux de capteurs. Dans l'approche des ensembles couvrants, le problème des brèches de couverture peut être

adressé soit par la minimisation du taux de brèche moyen⁴, soit par la minimisation du nombre maximal de cibles non couvertes ou par la minimisation du temps de brèche pour une cible particulière, sous contrainte de maximiser la durée de vie du réseau. Le temps de brèche est défini comme la durée pendant laquelle une cible reste non couverte. Le problème peut donc consister à trouver un nombre optimal d'ensembles couvrants disjoints ou non-disjoints satisfaisant une des contraintes énoncées ci-dessus. Cheng et al. [59] ont introduit le premier problème de la minimisation de la brèche de couverture dans un réseau et ont prouvé sa Np-complétude. Le problème est transformé en une programmation d'entier et deux heuristiques ont été proposées. Ils ont présenté une extension de leurs travaux dans [60] où trois instances du problème ont été posées : la brèche minimale, le temps de brèche minimal et la minimisation de la brèche maximale. L'objectif de la première instance c'est de calculer un nombre prédéfini d'ensembles couvrants de cardinalité $W+1$ tout en minimisant la brèche totale. Les deux autres instances considèrent un temps de brèche maximal et un nombre maximal d'ensembles couvrants comme données d'entrée de l'algorithme, qui doivent être calculés tout en maximisant la durée de vie du réseau.

Zorbas et Douligieris [58] ont défini deux instances du problème de la brèche de couverture dans le contexte de la couverture de cibles. La première instance tente de minimiser le taux de brèche total défini par 4.7, tout en garantissant que la durée de vie du réseau soit supérieure à un seuil fixé max_nl . L'objectif de la deuxième instance c'est de maximiser la durée de vie du réseau et atteindre un taux de brèche inférieur à max_tcbr . Le taux de brèche est défini par l'équation 4.7 :

$$tcbr = \sum_{p=1}^m \frac{tcbr_p}{m \cdot |T_0|} \quad (4.7)$$

Avec $tcbr_p$ le nombre de cibles non couvertes dans l'ensemble C_p , $|T_0|$ le nombre de cibles et m le nombre d'ensembles couvrants. L'algorithme proposé s'exécute en plusieurs itérations, et à la fin de chaque itération, un ensemble couvrant satisfaisant les contraintes de bande passante et de connectivité est formé. Chaque itération peut être séparée en deux étapes. Durant l'étape de la gestion de la bande passante, un ensemble couvrant tout ou partie des cibles est construit. Cette étape possède une phase d'application des noeuds où chaque ensemble couvrant est rempli successivement. Finalement une phase d'application de la connectivité est entamée, où tous les noeuds dans un ensemble couvrant sont connectés à la station de base, en utilisant des noeuds ne couvrant aucune cible comme noeuds relais.

4. La proportion de brèche dans tout le réseau.

4.8 Résumé du chapitre

Nous avons tenté dans ce chapitre, de faire une revue de la littérature de l'ensemble des problèmes de couverture de cibles dans les réseaux de capteurs sans fil. Bien que d'importantes contributions ont été apportées à ce problème, la question de la gestion de la couverture des cibles dans un RCSF associée à une gestion efficace de l'énergie reste ouverte. Dans le chapitre suivant, nous tenterons de poser formellement ce problème, et d'apporter notre contribution pour ce travail de recherche.

Chapitre 5

Gestion de la couverture de cibles dans les RCSFs

Dans ce chapitre, nous tentons de poser formellement le problème de la gestion de la couverture de cibles dans un réseau de capteurs sans fil, et d'introduire une nouvelle solution d'ordonnancement centralisée, en guise de contribution pour ce travail de recherche.

5.1 Description du problème

Dans cette partie, nous décrivons formellement le problème de la gestion de la couverture de cibles dans les RCSFs, ainsi que les caractéristiques d'un algorithme centralisé qui génère des ensembles couvrants disjoints, étant chacun capable de surveiller tous les points cibles dans une zone de déploiement. Nous considérons que plusieurs nœuds sont déployés aléatoirement dans une zone, pour couvrir un ensemble de cibles, dont les positions dans le champs sont fixes. Ces cibles sont donc définies par des points discrets dans la surface de la zone d'intérêt, et l'objectif c'est de couvrir l'ensemble complet de toutes les cibles, et d'étendre la durée de vie du réseau.

5.1.1 Paramètres du problème

Soit $Z_0 = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ l'ensemble des points cibles et $S_0 = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ l'ensemble des nœuds capteurs. Les nœuds capteurs sont aléatoirement déployés dans une zone d'intérêt pour couvrir des points cibles, placés à des emplacements connus. Chaque cible dans Z_0 est couverte par au moins un nœud capteur dans S_0 . Chaque capteur s_i dispose d'un rayon de détection noté r_{s_i} . Nous supposons que tout point cible situé à l'intérieur du cercle défini par la position d'un capteur s_i dans la zone (centre du cercle) et son rayon r_{s_i} , peut être surveillé (couvert) par ce capteur.

Chaque point cible est susceptible d'être couvert par plus d'un nœud

après le déploiement. Nous appelons $S(z_j)$ l'ensemble des nœuds capteurs couvrant la cible z_j . Chaque nœud dans $S(z_j)$ est capable de surveiller la cible z_j , c'est-à-dire $\forall s_i \in S(z_j) : |z_j - s_i| \leq r_{s_i}$, $S(z_j) \subseteq S_0$, $z_j \in Z_0$, où $|z_j - s_i|$ représente la distance euclidienne entre la cible z_j et le nœud capteur s_i . De manière analogue, $Z(s_i)$ désigne l'ensemble des cibles couvertes par le capteur s_i .

5.1.2 Objectifs du problème

L'objectif du problème de la gestion de la couverture de cibles, c'est surveiller (couvrir) un ensemble de points cibles dans une zone d'intérêt, et de maximiser la durée de vie du réseau. Etant donné que chaque cible est couverte par plusieurs nœuds capteurs simultanément après le déploiement, cet objectif peut être atteint en partitionnant les nœuds en plusieurs ensembles (couvrants) à activer successivement, l'un après l'autre. Chaque ensemble couvrant activé permet de couvrir toutes les cibles dans la zone d'intérêt. Ainsi la durée de vie du réseau est multipliée d'un facteur égal au nombre d'ensembles couvrants, issus de la partition. La couverture de tous les points cibles de la zone est assurée aussi longtemps que tous les nœuds d'un ensemble survivront, et ce jusqu'à la fin du temps d'activité de l'ensemble. Chaque ensemble est activé durant un intervalle, et les ensembles sont activés à des intervalles réguliers pour garder couvertes toutes les cibles de manière continue. A chaque instant durant la durée de vie du réseau, un seul ensemble est actif. Celui-ci contient les seuls nœuds actifs de la zone, pendant que tous les autres nœuds, appartenant aux autres ensembles couvrants, éteignent leur unité détection, jusqu'à ce que leur ensemble soit activé. Ainsi le problème de la gestion de la couverture de cibles dans un RCSF, étudié conjointement avec le problème de la maximisation de la durée de vie du réseau, peut être réduit au problème de trouver le nombre maximal d'ensembles couvrants disjoints, satisfaisant les objectifs fixés pour la couverture.

5.1.3 Le problème de la couverture d'ensembles

Le problème de la couverture d'ensembles soulevé dans plusieurs domaines. Bien que très souvent présenté comme un problème abstrait, il s'harmonise avec différents scénarios, dans le domaine de la fouille de données et de l'extraction de connaissance. Le problème basique est : étant donné une collection C ($C = \{C_1, \dots, C_K\}$) d'ensembles, contenant chacun quelques éléments d'un ensemble fini d'items I ($I = \{i_1, i_2, \dots, i_M\}$). L'objectif c'est de trouver une sous-collection C_s d'ensembles de C telle que l'union de tous les items contenus dans les ensembles de la sous-collection soit égale à I , c'est-à-dire :

$$\bigcup_{i=1} I(C_i) = I \quad (5.1)$$

Avec $I(C_i)$ désignant l'ensemble des items contenus dans l'ensemble C_i .

5.1.4 Gestion centralisée de couverture de cibles

Algorithme centralisé

Comme nous l'avons dit tantôt, les algorithmes centralisés s'exécutent à la station de base, en connaissance de la position de chaque nœud, et le résultat est transmis aux nœuds capteurs, se trouvant dans la zone d'intérêt. Le scénario est tel que après le déploiement, chaque nœud transmet ses informations (identifiants, coordonnées,...) à la station de base. Celle-ci exécute l'algorithme et retransmet le résultat aux nœuds directement.

Un algorithme centralisé de gestion de la couverture prend en entrée un ensemble de tuples de la forme $ENTREE = (z_1, S(z_1)), (z_2, S(z_2)), \dots, (z_k, S(z_k))$, où $z_j \in Z_0$ et $k = |Z_0|$. Chaque entrée de tuple définit un point cible z_j et l'ensemble des nœuds capteurs voisins de cette cible ($S(z_j)$). Un capteur peut apparaître dans plus d'un tuple ; ce qui veut dire que chaque capteur est capable de couvrir plusieurs cibles. L'algorithme produit une collection $C = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$ de M ensembles couvrants. Chaque ensemble couvrant est un sous-ensemble des nœuds capteurs disponibles ($C_m \subseteq S_0$) et l'union de tous les points cibles couverts par les nœuds de cet ensemble doit être égale à Z_0 , c'est-à-dire $\bigcup_{s_i \in C_m} Z(s_i) = Z_0$. Pour un algorithme produisant des ensembles couvrants disjoints, chaque nœud capteur ne participe qu'à au plus un ensemble couvrant, ce qui veut dire que $C_i \cap C_j = \emptyset, \forall i, j : 1 \leq i, j \leq M$ et $i \neq j$. L'objectif d'un tel algorithme c'est de maximiser la cardinalité $|C|$ de la collection C , représentant les ensembles couvrants construits, afin d'étendre la durée de vie du RCSF. Plus il y a d'ensembles couvrants, capables de couvrir toutes les cibles de la zone, plus la durée de vie est étendue.

La figure ci-dessus illustre les différentes étapes lors de la génération d'ensembles couvrants, par un algorithme centralisé. Il y a d'abord la phase d'initialisation qui suit les étapes de (1) à (6), et le déroulement de l'algorithme pour les étapes de (7) jusqu'à (15). L'algorithme est divisé en plusieurs stages (ou rounds). La liste des cibles non couvertes Z_{cour} est initialisée à Z_0 , l'ensemble complet des cibles de la zone, et celle des capteurs S_{cour} est initialisée à S_0 . Chaque stage correspond à sélectionner un nœud couvrant avec plus de précision, l'ensemble des cibles restant à couvrir dans Z_{cour} . A chaque stage la meilleure solution est sélectionnée. Si un nœud est choisi lors d'un stage (étape 9), il est enlevé de S_0 , et l'ensemble de ses cibles voisines sont enlevés de Z_{cour} . L'énergie du nœud est mise à jour, et le même processus se répète jusqu'à ce que l'ensemble des cibles Z_{cour} soit vide et qu'un ensemble couvrant soit formé (étape 15). L'algorithme reprend en testant d'abord si la liste des capteurs disponibles permet de couvrir toutes les cibles (étape 3). Si tel est le cas, un nouvel ensemble couvrant peut être

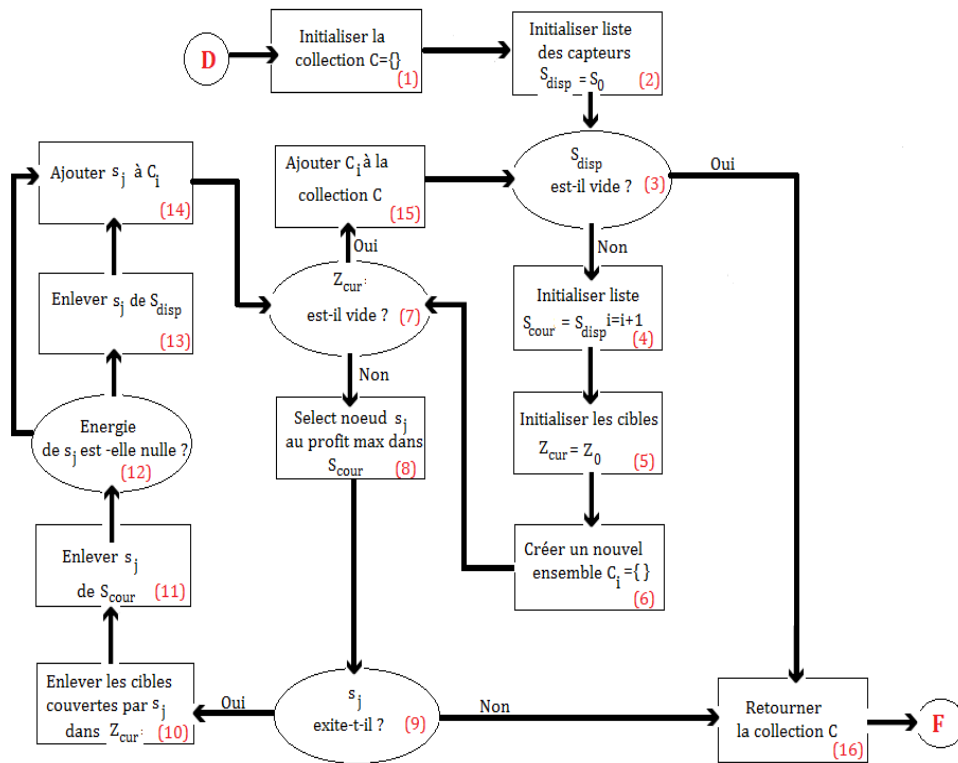


FIGURE 5.1 – Génération d'ensembles couvrants par un algorithme centralisé.

construit (étape (4)) à partir des capteurs disponibles, sinon l'algorithme termine et retourne la collection d'ensembles couvrants déjà calculée.

Gestion de la cible critique

Supposons que z_{min} ($z_{min} \in Z_0$) soit la cible couverte par le plus petit nombre de nœuds appartenant à S_0 : z_{min} est appelé cible critique. Alors $|S(z_{min})|$ qui représente la cardinalité du sous-ensemble de capteurs contenant z_{min} , désigne théoriquement le nombre maximal d'ensembles couvrants disjoints possibles, à cause de deux conditions. La première est que *i*) chaque ensemble couvrant calculé doit couvrir toutes les cibles, la deuxième est que *ii*) chaque nœud capteur ne participe qu'à au plus un ensemble couvrant. Cette limite est appelé le maximum théorique et peut être calculé à partir des tuples dans l'ensemble *ENTREE*. Durant le déroulement de l'algorithme, au fur et à mesure que les ensembles couvrants sont calculés, l'algorithme s'approche de l'optimal. Le maximum théorique constitue un indice pour un algorithme heuristique, renseignant sur la proximité de la solution proposée avec la solution optimale. Cependant, pour produire une collection d'ensembles couvrant de cardinalité égale au maximum théorique, une stratégie efficace doit être appliquée, pour la sélection des nœuds couvrant la cible critique z_{min} . Autrement dit, si plus deux ou plusieurs capteurs couvrant la cible critique sont contenus dans un même ensemble couvrant, le nombre d'ensembles couvrants est diminué de deux ou plusieurs. Ceci est d'autant plus vrai lorsque le déploiement est dense.

Stratégie de sélection des nœuds

La plupart des algorithmes centralisés se focalisent sur la sélection de nœuds couvrant la cible critique, en associant à chaque nœud une fonction de profit. Le nœud dont la fonction de profit est maximale, est sélectionné pour couvrir la cible critique. La fonction de profit tient souvent compte de la quantité de nœuds restant à couvrir. La stratégie élaborée dans [42] prend garde de couvrir la cible critique à chaque début de phase de construction d'un ensemble couvrant, par un nœud couvrant le plus grand nombre de cibles non encore couvertes, et couvrant le moins de cibles déjà couvertes. A chaque stage, ce processus est exécuté jusqu'à ce que l'ensemble des cibles soit vide, et qu'un ensemble couvrant est formé. Dans [46], Zorbas et al. ont élaboré une stratégie basée sur le calcul d'un attribut pour chaque nœud, définissant sa contribution, par rapport à l'ensemble des cibles couvertes. Notre approche (décrite avec plus de détails à la section suivante), propose comme fonction de profit, la calcul de la probabilité pour chaque nœud de couvrir l'ensemble des cibles non encore couvertes. Le nœud à la probabilité maximale est sélectionné à chaque stage. Cette stratégie, qui consiste à diviser le problème en plusieurs sous-problèmes à résoudre, et de choi-

sir à chaque stage de résolution d'un sous-problème, la meilleure solution est inspirée des algorithmes gloutons. A chaque stage d'un sous-problème, plusieurs solutions se présentent. Pour choisir un nœud de profit maximal durant un stage, une solution est d'explorer toutes les solutions présentes, les évaluer, avant d'en sélectionner une.

5.2 Proposition d'un algorithme

Dans cette partie, nous présentons un nouvel algorithme pour la gestion de la couverture de cibles dans les RCSFs. L'algorithme est centralisé et glouton. La décision de sélectionner à chaque stage un nœud capteur est basée sur le calcul de la probabilité pour chaque candidat, de couvrir les points cibles restants à couvrir [61].

5.2.1 Description de l'algorithme

Considérant les paramètres de la section (4.2), les algorithmes gloutons classiques sélectionnent à chaque stage le nœud couvrant le plus grand nombre de cibles dans l'ensemble des cibles non couvertes, enlève ces éléments de la liste des cibles, et répète le même processus jusqu'à ce que l'ensemble des cibles soit vide. Cependant, lorsque plusieurs capteurs couvrent le même nombre de cibles dans l'ensemble des cibles non encore couvertes, alors le nœud au plus petit indice est choisi. Cette manière de sélectionner le nœud au plus petit indice, constitue un choix aléatoire. Par exemple, supposons que nous ayons à un stage de la construction d'un ensemble, N capteurs restant dans l'ensemble des capteurs disponibles et K cibles restants à couvrir Z_{cour} et que chaque nœud capteur couvre le même nombre de cibles dans Z_{cour} , alors le premier nœud de la liste est choisi. Ce choix dépend de la règle de probabilité selon laquelle, si s_i et s_j désignent deux nœuds, candidats pour la sélection, lors d'un stage, alors :

$$P(s_i/U) > P(s_j/U) \implies |s_i| > |s_j| \quad (5.2)$$

Généralement, cette relation n'est pas toujours vraie, et ne garantit pas de sélectionner la meilleure solution à chaque stage. Supposons que la cible critique soit surveillée par un et un seul capteur après le déploiement, alors ce capteur sera sûrement sélectionné parmi les éléments de l'ensemble couvrant, indépendamment du nombre de cibles couvertes par ce capteur. Moins il y a de nœuds couvrant une cible, plus la probabilité de sélectionner ces nœuds capteurs couvrant cette cible doit être grande. Une solution plus convenable consisterait à calculer la probabilité de chaque nœud de couvrir l'ensemble des cibles non encore couvertes. Pour cela, nous définissons pour chaque capteur s_i , la probabilité de s_i étant donnée une cible z_j , c'est-à-dire la

probabilité que z_j soit couverte par s_i . Cette probabilité est définie par l'équation 5.3 :

$$P(s_i/z_j) = \frac{I(s_i, z_j)}{\sum_{k=1}^N I(s_k, z_j)} \quad (5.3)$$

Avec $I(s_i, z_j)$ représentant la fonction caractéristique de s_i définie par l'équation 5.4 :

$$I(s_i, z_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } z_j \in s_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.4)$$

Comme illustré dans les équations ci-dessus, la probabilité pour un nœud s_i de couvrir une cible z_j est égale au rapport entre sa fonction caractéristique et le nombre de nœuds capteurs restants, pouvant eux-même couvrir la cible z_j . Nous définissons la probabilité $P(s_i/Z_{cour})$ pour un nœud s_i de couvrir l'ensemble des cibles restants à couvrir dans Z_{cour} . Celle-ci est définie par l'équation 5.5 :

$$P(s_i/Z_{cour}) = (1/K) \sum_{j=1}^K P(s_i/z_j) \quad (5.5)$$

Avec K représentant le nombre total de cibles. L'équation 5.5 est appliquée pour définir un nouvel algorithme glouton dénommé AGGENC-P (Algorithme Glouton pour la Génération d'ENSEMBLES COUVRANTS - basé sur la Probabilité). AGGENC-P fonctionne en sélectionnant dans S_{cour} un élément S_i dont la probabilité par rapport à Z_{cour} ($P(S_i/Z_{cour})$) est maximale. L'élément sélectionné est ajouté à l'ensemble en cours de construction, et ses cibles voisines sont enlevées de l'ensemble des cibles Z_{cour} . Le processus se répète jusqu'à ce que la liste des cibles soit vide.

5.2.2 Initialisation des paramètres de l'algorithme

Durant la phase d'initialisation des paramètres de l'algorithme, les données d'entrée de l'algorithme sont construites, à partir des données en relation avec la couverture, issues du déploiement. Ainsi nous avons :

- Z_0 : l'ensemble initial des cibles.
- S_0 : l'ensemble initial des capteurs.
- $P_{S_0} = \{Z(s_1), Z(s_2), \dots, Z(s_n)\}$: l'ensemble des cibles couvertes par chaque capteur s_i dans la zone.
- $N_{Z_0} = \{S(z_1), S(z_2), \dots, S(z_k)\}$: l'ensemble des capteurs couvrant chaque cible z_j dans la zone.
- $max_{theo} = \min(|S(z_j)|, 1 \leq j \leq k)$: le maximum théorique.

5.2.3 Pseudo-code de AGGENC-P

```

ENTREES :           % Données d'entrée
 $S_0$  : CAPTEURS ;
 $Z_0$  : CIBLES ;
 $P_{S_0} : \{z(s_i), 1 \leq i \leq n\}$ 
 $N_{Z_0} : \{s(z_j), 1 \leq j \leq k\}$ 
 $max\_theo = \min(|N_j|, 1 \leq j \leq k)$  ;
SORTIE :           % Données de sortie
 $C_{total} = vide$  ;

 $S_{cour} \leftarrow S_0$  ;
Tant que ( $S_{cour} \neq \emptyset$ ) faire
     $C_{cour} \leftarrow vide$  ;
     $Z_{cour} \leftarrow Z_0$  ;
    Tant que ( $Z_{cour} \neq \emptyset$ ) faire
         $S_{select} \leftarrow CAPTEUR\_AU\_PROFIT\_MAX(S_{cour}, Z_{cour})$  ;
         $C_{couv} \leftarrow P_{S_{select}}$  ;
         $S_{cour} \leftarrow S_{cour} - S_{select}$  ;
         $Z_{cour} \leftarrow Z_{cour} - C_{couv}$  ;
         $C_{cour} \leftarrow C_{cour} \cup S_{select}$  ;
    Fin Tant que
     $C_{total} = C_{total} \cup C_{cour}$  ;
    Si ( $|C_{total}| == max\_theo$ ) Alors
        retourner  $C_{total}$  ;
    Fin Si
Fin Tant que
retourner  $C_{total}$  ;

```

Algorithme 1: Pseudo-code de AGGENC-P.

L'algorithme maintient une liste des capteurs disponibles S_{cour} , initialisée à l'ensemble total des capteurs (S_0). AGGENC-P est constitué de deux boucles : une première pour vérifier les nœuds capteurs disponibles, et une deuxième pour la construction d'ensembles couvrants.

La première boucle teste la disponibilité des nœuds capteurs dans la liste courante S_{cour} , et teste si toutes les cibles de l'ensemble Z_0 sont couvertes par les nœuds capteurs dans S_{cour} . Si tel est le cas, alors un nouvel ensemble couvrant peut être constitué, à partir des capteurs appartenant à S_{cour} . Une collection vide est créée, afin de construire un nouvel ensemble couvrant, et la liste courante des cibles Z_{cour} , est initialisée à l'ensemble des cibles

dans Z_0 . L'algorithme passe le control à la deuxième boucle, chargée de la construction du nouvel ensemble couvrant.

La deuxième boucle maintient la liste des cibles non encore couvertes, représentée au début par Z_0 , et tente de sélectionner un capteur présentant un profit maximal. La fonction CAPTEUR_AU_PROFIT_MAX est appelée, pour calculer lequel de ces capteurs appartenant à S_{cour} , dispose de la probabilité maximale pour couvrir les cibles restant dans Z_{cour} . Cette fonction expliquée plus loin, prend en entrée la liste des capteurs disponibles S_{cour} et celle des cibles restant à couvrir Z_{cour} , et retourne en sortie le capteur dont la probabilité est maximale (S_{select}). Celui-ci est sélectionné durant ce stage, par l'algorithme. Une fois sélectionné, toutes les cibles couvertes par S_{select} sont enlevées de l'ensemble des cibles non encore couvertes (Z_{cour}), S_{select} n'est également plus disponible dans l'ensemble des nœuds capteurs, et il est ajouté à l'ensemble couvrant en cours de construction (C_{cour}). Le même processus se réitère jusqu'à ce que l'ensemble Z_{cour} soit vide, et qu'aucune autre cible ne reste à couvrir. L'ensemble en construction est ajouté à la collection finale (C_{total}). A ce stade de l'exécution, l'algorithme vérifie si le maximum théorique a été atteint. Si c'est le cas, aucun autre ensemble couvrant ne peut être formé : la collection est retournée et l'algorithme termine. Sinon, une prochaine phase de construction d'un ensemble sera entamée.

5.2.4 La fonction de profit

Une stratégie rigoureuse de sélection des capteurs doit être développée, pour permettre à l'algorithme d'approcher d'avantage le maximum théorique. La fonction CAPTEUR_AU_PROFIT_MAX, dont le pseudo-code est présenté ci-dessous 2 permet d'effectuer la sélection des capteurs, à chaque stage.

```

Fonction CAPTEUR_AU_PROFIT_MAX( $S_{cour}, Z_{cour}$ ) :  $S_{MAX}$ 
     $max = -MAXFLOAT$ ;
     $j = 1$ ;
    Tant que ( $j \leq taille(S_{cour})$ ) faire
        Calculer  $P(s_j/Z_{cour})$ ;
        Si ( $P(s_j/Z_{cour}) \geq max$ ) Alors
             $max = P(s_j/Z_{cour})$ ;
             $S_{MAX} = S_{cour}(j)$ ;
        Fin Si
         $j = j + 1$ ;
    Fin Tant que
    Retourner  $S_{MAX}$ ;
Fin

```

Algorithme 2: Fonction calculant le capteur au profit maximal.

Durant un stage de sélection donné, deux situations peuvent se présenter : soit aucune des cibles n'est encore couverte, soit une partie des cibles se trouve déjà couverte. Ces deux situations correspondent respectivement à la première étape de la construction d'un ensemble couvrant et aux étapes suivantes. Pour la première étape, le capteur couvrant le maximum de cibles dans Z_0 est sélectionné ; tandis que pour les étapes suivantes, il est question de sélectionner le capteur couvrant le plus grand nombre de cibles non encore couvertes (dans Z_{cour}), et couvrant le moins possible les cibles déjà couvertes. La fonction choisit à chaque stage de sélection, de manière non aléatoire, le capteur présentant le meilleur profit. La probabilité pour un capteur s_j appartenant à S_{cour} de couvrir l'ensemble Z_{cour} est calculée par l'équation ci-dessous :

$$P(s_j/Z_{cour}) = \frac{1}{|Z_{cour}| + |Z(s_j) - Z(s_j) \cap Z_{cour}|} \sum_{i=1}^{|Z_{cour}|} \left(\frac{I(s_j, z_i)}{\sum_{k=1}^{|S_{cour}|} I(s_k, z_i)} \right) \quad (5.6)$$

Avec $|Z(s_j) - Z(s_j) \cap Z_{cour}|$ le nombre de cibles couvertes par s_j , et déjà couvertes par les capteurs sélectionnés dans l'ensemble couvrant en cours de génération. Le calcul de la probabilité cumulative pour chaque capteur, ensuite d'en choisir celui à la probabilité maximale, permet d'effectuer une meilleure sélection des capteurs à chaque stage. En normalisant la probabilité cumulative de chaque capteur s_j par $\frac{1}{|Z_{cour}| + |Z(s_j) - Z(s_j) \cap Z_0|}$, le capteur dont le profit est meilleur par rapport au nombre de cibles non encore couvertes, est sélectionné tout en tenant compte du nombre de ses cibles voisines déjà couvertes. Par exemple, si plusieurs capteurs couvrent le même nombre de cibles appartenant à Z_{cour} , c'est-à-dire non encore couvertes,

le capteur couvrant le plus faiblement possible les cibles déjà couvertes par les nœuds sélectionnés auparavant est choisi. Si tous ces capteurs, couvrant tous le même nombre de cibles dans Z_{cour} , couvrent également le même nombre de cibles déjà couvertes, alors ils ont tous les mêmes chances d'être sélectionnés durant ce stage. Cette situation se présente le plus souvent lorsque l'ensemble des cibles déjà couvertes est vide, c'est-à-dire au début de la construction d'un ensemble couvrant, ou lorsque la cardinalité de cet ensemble est inférieur à un certain seuil.

5.3 Analyse

L'algorithme AGGENC-P est constitué de deux phases : une phase d'initialisation et une phase de génération des ensembles couvrants. Durant la phase d'initialisation, la densité de chaque cible est définie comme étant le nombre de capteurs couvrant chaque cible. la densité est donné par la fonction caractéristique I et est définie telle que :

$$den(z_j) = \sum_{i=1}^N I(s_i, z_j)$$

Ainsi la probabilité d'un capteur s_i de couvrir une cible z_j ($P(s_i/z_j)$) est fixée à une valeur égale à $1/den(z_j)$ si z_j est couverte par s_i , et 0 sinon. Cette valeur est calculée une seule fois au début de l'algorithme pour chaque capteur, et ne nécessite pas d'être recalculée durant l'exécution de l'algorithme, c'est-à-dire la phase de génération des ensembles couvrants. De ce fait, la probabilité cumulative $P(s_i/Z_{cour})$ pour un capteur s_i de couvrir l'ensemble des cibles dans Z_{cour} , la liste des cibles restant à couvrir, peut être calculée une seule fois durant la phase d'initialisation, et mise à jour à chaque itération, en lui soustrayant la probabilité pour s_i de couvrir les cibles déjà couvertes. Ainsi $P(s_i/Z_{cour})$ durant une étape donnée dans la deuxième phase de l'algorithme est obtenue par l'équation ci-dessous :

$$P(s_i/Z_{cour}) = \sum_{k=1}^{|Z(s_i) \cap Z_{cour}|} P(s_i/z_k) - \sum_{l=1}^{|Z(s_i) - Z(s_i) \cap Z_{cour}|} P(s_i/z_l) \quad (5.7)$$

Avec $|Z(s_i) \cap Z_{cour}|$ désignant le nombre de cibles couvertes par le capteur s_i dans Z_{cour} , et $|Z(s_i) - Z(s_i) \cap Z_{cour}|$ le nombre de cibles couvertes par s_i et déjà couvertes par les capteurs contenus dans l'ensemble en cours de construction.

Pour sélectionner un capteur à inclure dans un ensemble couvrant, le choix doit être fait sur la base d'une comparaison des profits de tous les capteurs disponibles. Ce qui veut dire que l'algorithme teste pour la première itération tous les capteurs disponibles dans S_{cour} et en choisit celui dont

le profit est maximal. Si un capteur est sélectionné, l'ensemble des cibles couvertes par ce capteur est enlevé de l'ensemble des cibles restant à couvrir dans Z_{cour} . A chaque nouvelle itération, le nombre de capteurs (cardinalité de S_{cour}) est diminué de 1, et l'ensemble des cibles dans Z_{cour} est diminué du nombre de cibles déjà couvertes par les capteurs déjà sélectionnés. Lorsque Z_{cour} est épuisé, l'algorithme réinitialise Z_{cour} à la liste initiale des cibles Z_0 , et reconstruit un nouvel ensemble couvrant. L'algorithme termine lorsque la liste des capteurs disponibles S_{cour} est vide, ou que le maximum théorique a été atteint. Au pire des cas, tous les capteurs disponibles dans S_{cour} sont utilisés. Étant donné que l'algorithme prend en entrée n capteurs et k cibles pour produire des ensembles couvrants, le processus se déroule comme suit :

- Première itération : n capteurs sont testés pour k cibles : complexité $n \times k$.
- Deuxième itération : $n - 1$ capteurs sont testés pour $k - 1 \bmod k$ cibles : complexité $(n - 1) \times (k - 1 \bmod k)$.
- Troisième itération : $n - 2$ capteurs sont testés pour $k - 2 \bmod k$ cibles : complexité $(n - 2) \times (k - 2 \bmod k)$.
- ...
- $N^{ième}$ itération : $n - (n - 1)$ capteurs sont testés pour $k - (n - 1) \bmod k$ cibles : complexité $(n - 1) \times (k - (n - 1) \bmod k)$.

Le temps consommé par l'algorithme pour la génération des ensembles couvrants est égal à la somme :

$$T(n) = nk + (n - 1)(k - 1 \bmod k) + (n - 2)(k - 2 \bmod k) + (n - 3)(k - 3 \bmod k) + \dots + (n - (n - 1))(k - (n - 1) \bmod k) \quad (5.8)$$

$$T(n) = \sum_{i=0}^{n-1} (n - i)(k - i \bmod k) \quad (5.9)$$

Nous en déduisons que la complexité au pire des cas de AGGENC-P est égale à $O(n^2k)$.

5.4 Résumé du chapitre

Ce chapitre était consacré à la formalisation du problème de la gestion de la couverture de cibles dans les réseaux de capteurs sans fil. Une nouvelle solution d'ordonnancement centralisée (AGGENC-P : Algorithme de Génération d'ENSEmbles Couvrants - basé sur la Probabilité) a été introduite, décrite et analysée en terme de complexité. Le chapitre suivant sera consacré à l'implémentation de notre solution et à l'analyse de ses performances.

Chapitre 6

Simulation de AGGENC-P

Ce chapitre est consacré à la simulation de notre algorithme AGGENC-P. Dans un premier temps, nous allons exposer le plan d'expérience, qui tente de définir les principaux objectifs auxquels la simulation est supposée répondre. Ensuite, nous parlerons des détails de l'implémentation dans la section suivante, au cours de laquelle une analyse des performances de notre solution sera effectuée. Enfin nous tenterons de confronter les résultats obtenus à l'issue de l'implémentation de AGGENC-P, avec quelques protocoles déjà proposés dans la littérature.

6.1 Plan d'expérience

Comme nous l'avons déjà mentionné, AGGENC-P est un algorithme d'ordonnancement qui procède par partitionnement de la population des capteurs déployés dans une zone d'intérêt en plusieurs ensembles couvrants. Chaque ensemble couvrant est en mesure de garantir la couverture de toutes les cibles dans la zone. Les ensembles sont activés un à un, successivement, pour allonger la durée de vie du réseau de capteurs. Étant donné que les ensembles calculés par AGGENC-P sont disjoints, c'est-à-dire que chaque capteur ne peut appartenir qu'à au plus un ensemble, et que chaque ensemble actif à un moment donné, contient les seuls capteurs actifs dans la zone d'intérêt, la durée de vie du réseau est définie par le nombre d'ensembles couvrants calculés par l'algorithme, multiplié par le temps d'activité de chaque ensemble. Nous supposons dans les simulations que tous les capteurs disposent des mêmes réserves d'énergie à l'état initial, et que chaque capteur appartenant à un ensemble couvrant en activité, reste actif jusqu'à l'épuisement de sa réserve d'énergie. Par conséquent, tous les capteurs actifs appartenant à un même ensemble épuiseront en même temps leur réserve d'énergie. Ainsi le temps d'activité de chaque ensemble couvrant est égal à la durée d'activation continue d'un capteur. La durée d'activation continue d'un capteur est égale au temps de fonctionnement du capteur, sans

interruption, jusqu'à ce que sa réserve d'énergie soit épuisée. En outre, nous considérons un modèle simplifié de dissipation de l'énergie, basé sur une consommation linéaire de l'énergie dont dispose chaque capteur. Par exemple si un capteur s_i dispose de e_{s_i} unités d'énergie, alors la durée d'activation continue (A_{s_i}) de ce capteur est une fonction linéaire de e_{s_i} .

Dans un premier temps, nous procéderons à la simulation de AGGENC-P en tentant de dégager les différents aspects de l'algorithme. Celle-ci est supposée pouvoir estimer la durée pendant laquelle toutes les cibles de la zone restent couvertes, dépendant du nombre de capteurs déployés, du nombre de cibles dans la zone, et de la puissance de détection des capteurs. Dans un deuxième temps, nous tenterons de faire une comparaison des performances de notre proposition, par rapport aux solutions centralisées proposées respectivement par Slijepcevic et al.[42] et Zorbas et al.[46]. Le protocole proposé dans [42] constitue la première solution centralisée, basée sur le modèle glouton et générant des ensembles couvrants. Il a été proposé pour résoudre la problématique de la couverture de surface associée à la maximisation de la durée de vie des RCSFs. La solution de Zorbas et al. [46], qui constitue à l'heure actuelle la meilleure solution centralisée générant des ensembles couvrants disjoints ou non disjoints, a été comparée avec AGGENC-P, afin de mettre en évidence les aptitudes et les performances de chacun de ces deux algorithmes, au regard de la problématique du maintien de la couverture des cibles et de l'extension de la durée de vie du réseau.

6.2 Implémentation de AGGENC-P

6.2.1 Plateforme matérielle et logicielle

Pour tester les performances de notre solution, un prototype d'implémentation de AGGENC-P a été développé sous le langage de programmation MATLAB, version 7.10.0. Les simulations ont été réalisées sur une machine munie de deux cœurs de processeurs (dual core), chacun disposant d'une puissance de 2Ghz, avec une mémoire vive de 4 Go de capacité, fonctionnant sur un système d'exploitation Windows 7, *Eternity*, version 32 bits. Le prototype d'implémentation développé sous MATLAB, est constitué de plusieurs modules de bases parmi lesquels : le module de génération de la topologie, le module d'exécution de l'algorithme AGGENC-P qui est lui même composé de plusieurs sous-modules facilitant l'implémentation de l'algorithme, et le module d'estimation de la durée de vie du réseau. Le module de génération de la topologie contient des paramètres ajustables tels que : les dimensions de la zone de déploiement, la densité des capteurs et celle des cibles dans la zone d'intérêt, ainsi que les caractéristiques physiques des capteurs (rayons de détection, énergie, position dans le champ, etc ...). Le module d'exécution de l'algorithme AGGENC-P est développé indépendamment du module de génération de la topologie, au même titre

que les algorithmes de Slijepcevic et al. [42] et Zorbas et al. [46]. Ceci permettra de fixer les paramètres de simulation lors de la comparaison des performances des différents protocoles.

6.2.2 Environnement de simulation

Les simulations ont été réalisées dans le contexte d'un réseau stationnaire¹, constitué de plusieurs capteurs et de cibles aléatoirement déployés dans une surface plane de dimension ajustable. Le nombre de capteurs dans la zone est également un paramètre ajustable de l'algorithme, et peut varier par rapport au scénario de simulation considéré. Les cibles sont déployées en premier lieu dans la surface, ensuite les capteurs sont aléatoirement dispersés dans la surface pour détecter les points cibles. Chaque élément (cibles et capteurs) est identifié par un ID unique et ses coordonnées dans le champ. Une fois le déploiement effectué, l'algorithme calcule l'ensemble des cibles couvertes par chaque capteur, initialise ses paramètres et entame son exécution. Certains capteurs sont susceptibles de ne couvrir aucune cible après le déploiement, du à la dispersion aléatoire des éléments du réseau. Ces capteurs ne seront pas candidats lors de la sélection des éléments composant chaque ensemble couvrant. Cependant, le déploiement est tel que chaque cible dans le champ doit être couverte par au moins un capteur. Dans le cas contraire, il serait impossible de constituer un ensemble couvrant satisfaisant une couverture complète de l'ensemble des cibles.

6.2.3 Scénario 1

Le premier scénario de simulation étudie l'impact de la population des capteurs, sur la durée de vie du réseau. Pour cela, un réseau stationnaire est considéré, de dimension $500m \times 500m$, où la population des capteurs composant le réseau est variée tandis que certains paramètres tels que le nombre de cibles ainsi que le rayon de détection des capteurs, sont maintenus fixes. Nous considérons les paramètres suivants :

- n : le nombre de capteurs dans la zone. La population des capteurs est varié de 50 à 500.
- m : le nombre de cibles. Ce nombre est fixé à 20 pour ce scénario.
- r : le rayon de détection de chaque capteur. Chaque capteur dispose d'un rayon fixe égal à $200m$.

Pour chaque nombre de capteurs, le scénario est exécuté cinq fois, ensuite la moyenne de la durée de vie du réseau est calculée. Les résultats de simulation sont illustrés dans la figure 6.1.

Comme le montre la figure, la durée de vie du réseau augmente de manière considérable par rapport au nombre de capteurs composant le réseau. Plus le nombre de capteurs déployés est grand, plus chaque cible est susceptible

1. Dans un réseau stationnaire, les capteurs sont statiques.

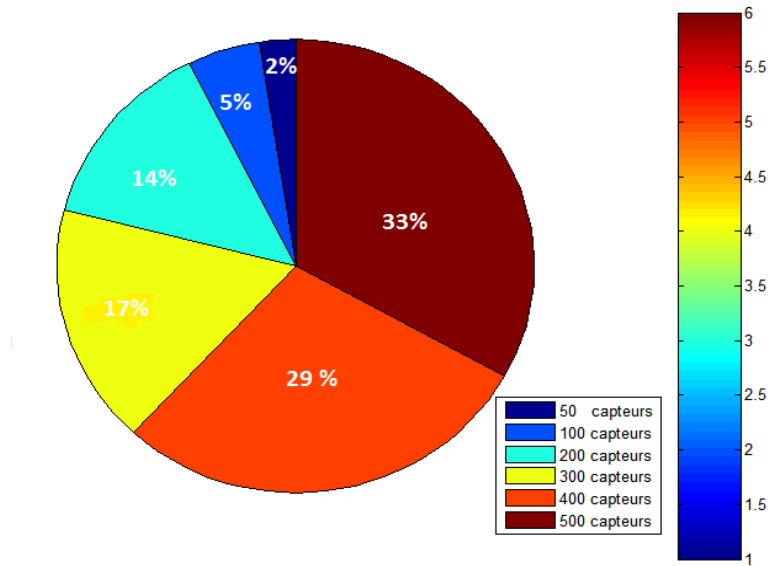


FIGURE 6.1 – Taux de longévité du réseau par rapport à la densité des capteurs.

d'être couverte par plusieurs capteurs. Ce qui augmente la probabilité de constituer d'avantage d'ensembles couvrants, qui conduit à une extension de la durée de vie du réseau. Ainsi, considérant un nombre fixe de cibles dans le champ, pour un nombre de capteurs variant de 50 à 500, la durée de vie passe de moins dix unités de temps avec 50 capteurs à plus de 90 avec 500 capteurs, comme le montre la figure 6.2.

6.2.4 Scénario 2

Le deuxième scénario de la simulation permet d'étudier l'impact de la variation de la capacité de détection des capteurs sur la performance de notre algorithme. Au fur et à mesure que le rayon de détection des capteurs est augmenté, nous pouvons nous attendre à ce que la couverture des cibles dans la zone soit améliorée, et que par conséquent plus d'ensembles couvrants soit calculé. En déployant 50, 100 et 150 capteurs pour couvrir respectivement 5, 10, et 15 cibles, le rayon de détection des capteurs est varié de 100 à 300 avec une incrémentation de 50. L'algorithme AGGENC-P est déroulé cinq fois, ensuite la moyenne de la durée de vie est calculée.

La figure 6.3 illustre la courbe de l'évolution de la durée de vie du réseau par rapport à l'augmentation de la capacité de détection des capteurs. Nous constatons que la durée de vie du réseau évolue de manière quasi linéaire lorsque le rayon de détection des capteurs augmente. Par exemple pour 150 capteurs, la durée de vie du réseau évolue de moins de 10 unités de temps à plus de 50, lorsque la capacité de détection des capteurs varie de 100m

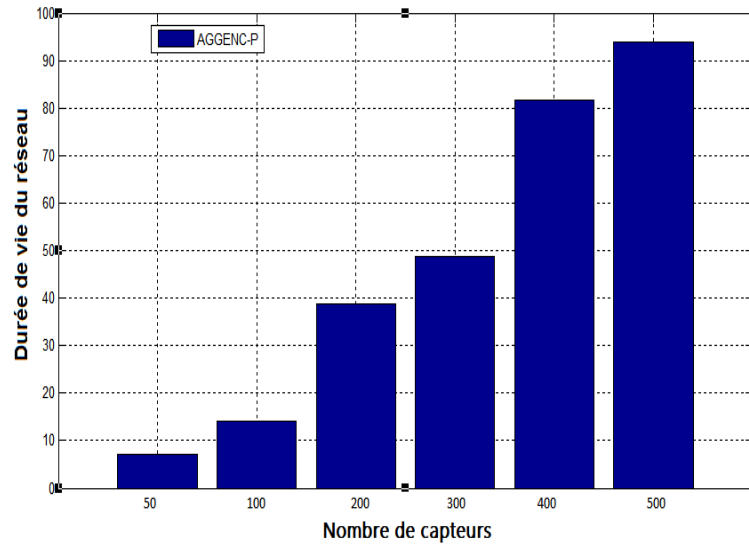


FIGURE 6.2 – Durée de vie du réseau par rapport à la densité des capteurs.

à 300m. Ceci peut s'expliquer de manière cohérente par une augmentation pour chaque capteur de la proportion de cibles couvertes dans le champ, lorsque le rayon est augmenté. Par conséquent, le nombre de capteurs participant dans chaque ensemble couvrant sera plus réduit, du à la quantité des cibles couvertes par chaque capteur. Ainsi l'algorithme est susceptible de produire plus d'ensembles couvrants, qui se traduit par un allongement de la durée de vie du réseau. A défaut de déployer un très grand nombre de capteurs, la puissance de détection des capteurs peut constituer une alternative au problème de la maximisation de la durée de vie du réseau.

6.3 Comparaison de performances

Dans cette section, nous faisons une comparaison de AGGENC-P avec deux autres protocoles, proposés respectivement dans [42] et [46]. Pour y arriver, nous procédons à trois scénarios de simulation au cours desquels nous mettrons en évidence les performances des algorithmes, par rapport à la durée de vie, et à la proximité des résultats avec l'optimum théorique.

6.3.1 Scénario 3

Ce troisième scénario de simulation permet d'analyser les performances de notre algorithme AGGENC-P parallèlement aux performances de l'algorithme de Slijepcevic [42], et d'effectuer une comparaison des deux protocoles lorsque la densité des capteurs dans le réseau est progressivement augmentée.

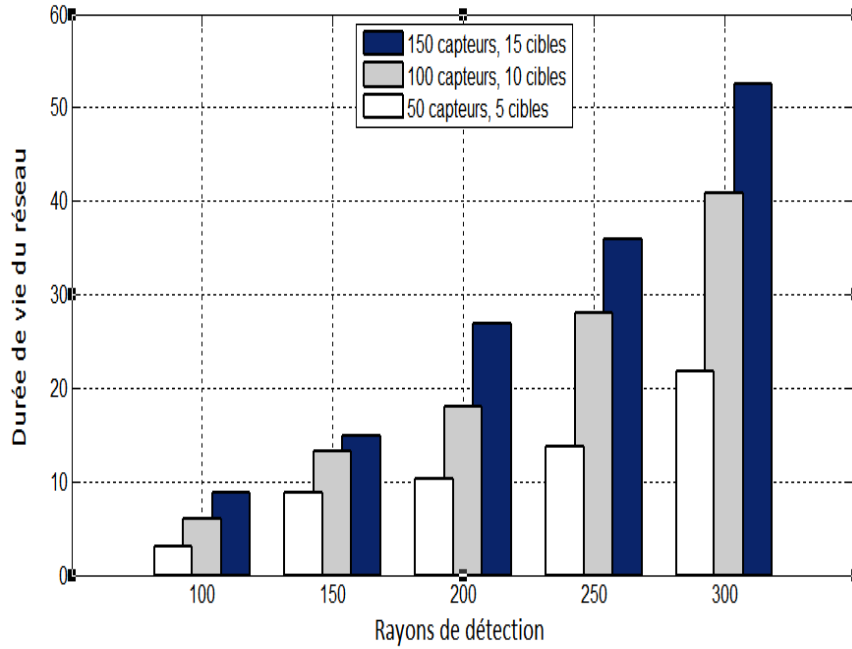


FIGURE 6.3 – Evolution de la durée de vie du réseau par rapport au rayon de détection des capteurs.

Pour y arriver, nous avons considéré un réseau de capteurs stationnaire caractérisé par un environnement de simulation de dimension $100m \times 100m$, où sont déployés des capteurs ainsi qu'un nombre fixe de cibles. Les deux algorithmes sont exécutés chacun cinq fois pour chaque configuration (nombre de capteurs déployés), et la moyenne de la durée de vie est calculée pour chaque algorithme. Les paramètres ci-dessous ont été considérés dans ce scénario :

- n : le nombre de capteurs dans la zone. La population des capteurs est variée de 50 à 500.
- m : le nombre de cibles. Le nombre de cibles est fixé à 10.
- r : le rayon de détection de chaque capteur. Le rayon de détection des capteurs est fixé à $30m$.

La figure 6.4 illustre les résultats obtenus à l'issue du déroulement de ce scénario. A travers la figure, nous pouvons constater une croissance de la durée de vie du réseau par rapport au nombre de capteurs, pour les deux algorithmes. La durée de vie varie de moins de 10 unités de temps pour les deux algorithmes lorsque le nombre de capteurs déployé est de 50, à plus de 30 unités de temps pour Slijepcevic[42], et à 60 pour AGGENC-P lorsque le nombre de capteurs déployé est égal à 500. Au fur et à mesure que la densité des capteurs est augmentée, nous remarquons que l'écart des durées de vie calculées par les deux algorithmes devient important. Nous pouvons donc conclure pour ce scénario, que notre algorithme montre de meilleures

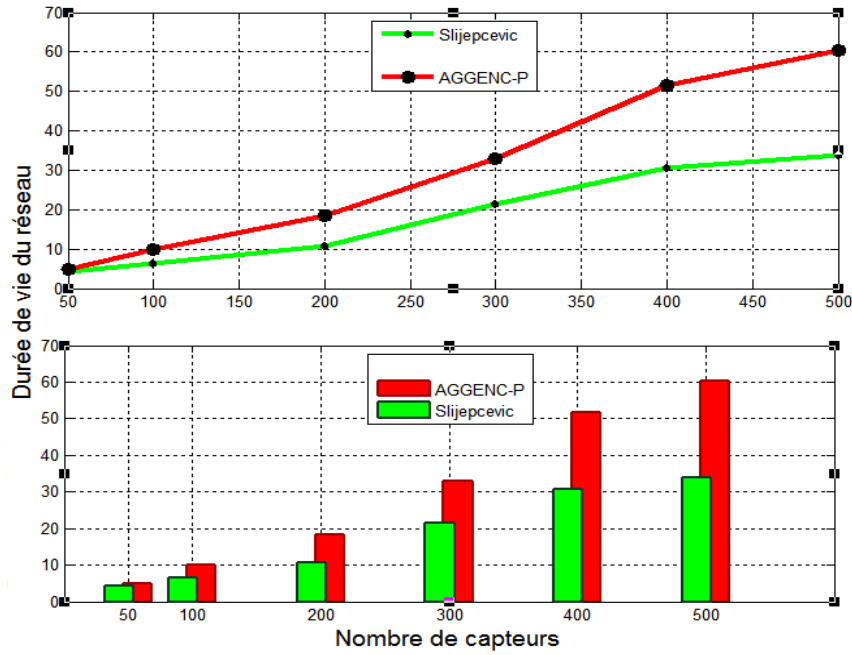


FIGURE 6.4 – Comparaison de performances de AGGENC-P et Slijepcevic.

performances que la solution proposée par Slijepcevic [42], et ce lorsque la densité des capteurs dans la zone devient de plus en plus importante.

6.3.2 Scénario 4

Dans ce quatrième scénario, nous tentons de simuler les performances de notre algorithme AGGENC-P, parallèlement avec celles de Zorbas [46]. Les mêmes paramètres de simulation du scénario 3 sont considérés. La figure 6.5 illustre les résultats obtenus à l'issue du déroulement de ce scénario. Tout comme notre algorithme, nous pouvons constater à travers cette figure que la durée de vie du réseau, calculée par l'algorithme de Zorbas, a tendance à croître lorsque le nombre de capteurs déployés est augmenté. Nous constatons également que l'écart entre les durées de vie calculées par les deux algorithmes n'est pas trop visible avec une population de capteurs variant de 100 à 300, mais devient de plus en plus important lorsque la densité des capteurs atteint un certain niveau. Par exemple la moyenne des durées de vie calculées par les deux algorithmes convergent vers les mêmes proportions lorsque le nombre de capteurs varie de 50 à plus de 300, et au-delà 400 capteurs, l'écart entre les durées de vie calculées par AGGENC-P et Zorbas[46] s'amplifie peu à peu. Nous pouvons donc conclure à l'issue de ce scénario de simulation que notre solution AGGENC-P montre de meilleures performances en terme de durée de vie, et que AGGENC-P résiste mieux à

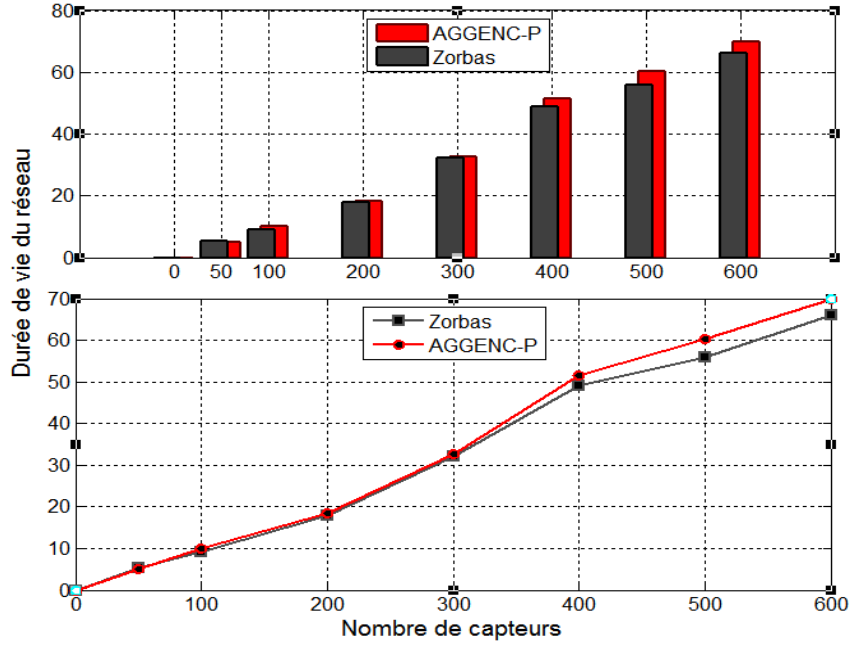


FIGURE 6.5 – Comparaison de performances de AGGENC-P et Zorbas.

la montée à l'échelle de la densité des capteurs .

6.3.3 Scénario 5

Le cinquième scénario de simulation a pour objectif de comparer les performances des trois algorithmes (Slijepcevic[42], Zorbas[46] et AGGENC-P) avec le maximum théorique. Le maximum théorique définit le nombre maximal d'ensembles couvrants qu'il est possible de constituer, considérant un déploiement donné. Lorsque les ensembles couvrants sont disjoints et garantissent chacun une couverture complète des cibles, le maximum théorique est égal au plus petit nombre de cibles couvertes par un capteur après le déploiement des capteurs dans la zone. En déployant une population de capteurs variant de 50 à 500, avec un nombre fixe de points cibles, nous nous attendons à ce que l'algorithme montrant de meilleures performances produise des résultats proches du maximum théorique, en termes d'ensembles couvrants calculés. Chaque algorithme est exécuté cinq fois avec chaque nombre de capteurs, ensuite la moyenne du nombre d'ensembles couvrants produit par chaque algorithme est calculée. Le tableau 6.1 résume les résultats obtenus à l'issue du déroulement du scénario.

Nous pouvons constater une très proche similarité entre les résultats fournis par notre algorithme (AGGENC-P) et le maximum théorique. Dans la plupart des cas, le nombre d'ensembles couvrants calculés par l'algorithme

Capteurs	Max. Théo	AGGENC-P	Zorbas	Slijepcevic
50	02.00	02.00	02.00	01.60
100	05.40	05.40	05.00	03.80
200	13.60	13.60	12.20	08.60
300	14.00	14.00	13.40	09.20
400	25.40	25.20	24.20	20.00
500	28.40	28.40	27.20	20.80

TABLE 6.1 – Résultats de simulation du scénario 5.

AGGENC-P est égal au maximum théorique. Pour l'algorithme de Zorbas, le maximum théorique n'est atteint qu'avec 50 capteurs, alors que pour Slijepcevic le maximum théorique n'a été atteint pour aucun nombre de capteurs. Ceci peut s'expliquer de manière cohérente par le fait que la stratégie de sélection des capteurs à chaque stage est plus rigoureuse avec AGGENC-P qu'avec les deux autres. Lorsque le capteur sélectionné durant un stage donné, couvre plus qu'une cible critique (cible couverte par le plus petit nombre de capteurs), alors le nombre d'ensembles couvrants calculés par l'algorithme est diminué de 1 ou plus. Ce qui fait que le maximum théorique ne sera pas atteint. AGGENC-P se base sur le calcul de la probabilité pour effectuer la meilleure sélection à chaque stage. Et cette sélection, à la différence des autres algorithmes, ne privilégie pas toujours à chaque stage le capteur couvrant le plus grand nombre de cibles restant à couvrir dans l'ensemble des cibles, du fait que celui-ci ne présente pas toujours le meilleur profit. Le calcul de la probabilité permet de rendre plus formelle la contribution de chaque capteur candidat à la sélection, et effectuant un choix plus précis à chaque stage de prise de décision.

6.4 Résumé du chapitre

Pour cet avant-dernier chapitre, nous nous sommes focalisés sur l'implémentation de notre algorithme AGGENC-P, afin de tester ses performances. L'algorithme a été implémenté sous MATLAB, puis comparé à d'autres solutions centralisées existants. Ces tests ont permis de mettre en évidence les performances de notre solution sur les protocoles existants. Cependant, au terme de cette simulation, beaucoup de nouvelles perspectives sont suscitées, après avoir dégagé les différentes caractéristiques et aspects marquants de notre algorithme. Le chapitre suivant tente de faire un résumé de notre travail, et de cadrer notre contribution en mentionnant les limitations éventuelles ainsi que certaines perspectives.

Chapitre 7

Conclusion générale

Après avoir étudié la couverture dans les RCSFs, en particulier la couverture de cibles, nous avons tenté de proposer une solution au problème de la gestion de la couverture de cibles, conjointement au problème de la maximisation de la durée de vie des RCSFs. Dans cette conclusion, une synthèse du travail accompli tout au long de ce document sera réalisée dans un premier temps. Ensuite, nous tenterons de cadrer notre contribution en mettant en évidence d'éventuelles limites. Enfin des perspectives pour les travaux futurs seront données .

7.1 Synthèse

L'objectif principal de notre travail de recherche était d'étudier le problème de la gestion de la couverture de cibles dans les réseaux de capteurs sans fil. Pour y arriver, l'essentiel des travaux en rapport avec la question de la couverture de cibles dans les RCSFs a été présenté, avant de proposer un mécanisme centralisé d'ordonnancement de l'activité des capteurs, permettant de garantir la couverture des cibles dans une zone d'intérêt et d'allonger la durée de vie du réseau.

Nous avons introduit dans un premier temps une présentation des RCSFs en mettant en évidence les différentes caractéristiques des équipements composant les RCSFs. Ensuite certains mécanismes de déploiement sont présentés, avant d'introduire quelques scénarios d'applications, l'architecture protocolaire et la topologie des RCSFs. Après cela, nous avons tenté de résumer les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des RCSFs, et finalement pour cette partie, une classification des issues de recherches dans le domaine des réseaux de capteurs est fournie. La couverture en tant qu'une des issues de recherches importantes dans ce domaine, est introduite à la section suivante.

Le chapitre exposant la couverture dans les RCSFs, expose les principales motivations du problème de la couverture dans les RCSFs, qui peuvent

être résumées par la gestion de la qualité de service lors de l'observation d'un phénomène, associée à une gestion efficace et efficiente de l'énergie consommée par les capteurs. Cette efficacité est atteinte par un ordonnancement rigoureux, qui passe par un contrôle de l'activité des capteurs dans une zone d'intérêt. En outre, la couverture doit prendre en compte d'autres contraintes en rapport avec la spécificité des RCSFs (déploiement, autonomie, passage à échelle, ...). Pour finir ce chapitre, les principaux modèles de couverture sont exposés, basés sur une formulation mathématique.

Nous avons tenté dans le quatrième chapitre de faire une revue de la littérature de la couverture de cibles dans les RCSFs. Étant donné que le déploiement influence rigoureusement sur la couverture, nous avons introduit dans un premier temps la couverture de cibles déterministe, qui pose comme principal problème l'optimisation du placement des capteurs dans une zone d'intérêt et la minimisation des coûts de conception. Après avoir formulé ces problèmes, les différentes techniques et approches de résolution de ces problèmes ayant été proposées dans la littérature, ont été exposées. Dans un deuxième temps, la couverture selon un déploiement aléatoire est étudiée, en passant en revue les différentes solutions centralisées et localisées existantes. Dans cette étude, nous avons présenté et analysé les protocoles basés sur les différentes approches (ensembles couvrants disjoints, non-disjoints, connectés, ...). D'autres techniques de couverture sont également relatées, en rapport avec certaines spécificités des RCSFs telles que l'hétérogénéité des équipements, ou les contraintes de bande passante.

Dans le chapitre 5, nous avons traité le problème de la gestion de la couverture des cibles dans les réseaux de capteurs sans fil. Pour atteindre cet objectif, nous avons proposé un protocole intitulé AGGENC-P (Algorithme de Génération d'ENSEmbles Couvrants - basé sur la Probabilité) qui est une solution centralisée, procédant par ordonnancement de l'activité des capteurs, pour améliorer la longévité des réseaux, et en même temps garantir une couverture de toutes les cibles dans une zone d'intérêt. Cet ordonnancement est atteint par un partitionnement de la population des capteurs composant un RCSF en plusieurs ensembles exclusifs, ensuite les ensembles sont activés un à un afin d'étendre la durée de vie du réseau. L'algorithme a été formellement décrit et analysé, et ses différentes caractéristiques ont été présentées.

Finalement, des simulations ont été réalisées pour évaluer l'algorithme AGGENC-P. Un prototype d'implémentation a été développé sous MATLAB, et ensuite une analyse des résultats de simulation a été menée, parallèlement à des comparaisons de AGGENC-P avec quelques protocoles proposés dans la littérature. L'analyse expérimentale de chacun des algorithmes ainsi que leur comparaison, ont permis de mettre en évidence la performance de AGGENC-P par rapport aux autres protocoles, en termes de maintien de la couverture des cibles, et d'extension de la durée de vie du réseau.

7.2 Limitations

Dans ce travail de recherche dont l'objectif était d'étudier le problème de la gestion de la couverture de cibles dans les RCSFs, nous pouvons conclure suite à cette synthèse ci-dessus, que certains objectifs ont été atteints. Cependant, nous pouvons citer certaines limitations liées à cette recherche. Tout d'abord, l'algorithme AGGENC-P que nous avons proposé en guise de contribution, est centralisé, en ce sens qu'il s'exécute à la station de base avec une population de capteurs inférieure à une certaine échelle. Bien que les solutions centralisées possèdent l'avantage de pouvoir contourner les limitations en capacités de calcul que présentent les capteurs, elles ne sont tout de même pas applicables à des architectures à très grande échelle, comme c'est le cas avec certaines applications comportant des milliers, voire des millions de capteurs. De telles configurations fonctionnent mieux avec des protocoles distribués. Ensuite, le modèle de couverture considéré dans l'algorithme est un modèle de couverture binaire et circulaire. C'est-à-dire que chaque capteur garde une portée de détection constante, définie par un cercle à l'intérieur duquel tout point est couvert. Certains types de capteurs tels que ceux utilisés pour la détection d'ondes acoustiques ou sismiques, possèdent généralement une puissance de détection variant par rapport à la distance séparant leur position et celle de la cible dans un champs. Enfin, bien que l'algorithme montre de meilleures performances comparé aux autres protocoles basés sur les mêmes approches, une amélioration de la complexité de AGGENC-P est encore faisable, de même que la prise en compte de la contrainte de la connectivité dans la génération des ensembles couvrants. Pour l'instant, nous supposons que l'algorithme reste applicable dans un contexte où tous les capteurs sont directement connectés à une station de base, pour reporter les données de détection.

7.3 Perspectives

Les réseaux de capteurs présentent des axes de recherche très fertiles et sont aujourd'hui omniprésents dans presque tous les secteurs d'activité. Cependant, de nombreux problèmes restent à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans des conditions réelles. Dans le cadre de notre sujet, les perspectives pour les travaux futurs devraient être orientées par rapport aux limitations de notre travail de recherche. L'approche de génération des ensembles couvrants non-disjoints est susceptible de produire des résultats meilleurs en termes de longévité du réseau. Étant donné que l'espace de solution des ensembles couvrants disjoints est contenu dans celui des ensembles couvrants non-disjoints, une première perspective consisterait à étudier le processus de génération des ensembles couvrants non-disjoints avec AGGENC-P, afin de maximiser d'avantage la durée de vie du réseau.

Ensuite la prise en compte de la connectivité du réseau, conjointement avec le maintien de la couverture des cibles, est une issue aussi importante que la couverture dans les RCSFs. Dans ce contexte, le problème des ensembles couvrants connectés peut être posé dans de futures recherches. En outre, certains réseaux de capteurs possèdent des équipements disposant de différentes capacités, tels que la puissance de détection et/ou les capacités de communication des capteurs. L'étude de la couverture dans ces types de réseau permettrait de mieux contrôler la qualité de la couverture des cibles, tout en gérant de manière plus efficiente la contrainte énergétique. C'est le cas des réseaux hybrides où les capteurs peuvent dynamiquement ajuster leur rayon de détection, pour contrôler la proportion d'espace couverte dans la zone d'intérêt. Enfin, comme nous l'avons déjà énoncé dans la section abordant les limitations de notre travail de recherche, certains paramètres tels que la montée à l'échelle de la population des capteurs dans une zone doivent être prises en compte, en proposant des algorithmes décentralisés, où l'ordonnancement de l'activité des capteurs s'effectue de manière distribuée. De même que nous sommes motivés par une adaptation de notre algorithme AGGENC-P, à suivre un modèle de couverture plus réaliste pour certaines applications de couverture de cibles, en prenant en compte la sensibilité de la couverture par rapport à certains paramètres tels que la distance.

Bibliographie

- [1] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 38(4) :393–422, 2002.
- [2] Waltenegus Dargie and Christian Poellabauer. *Fundamentals of wireless sensor networks : theory and practice*. Wiley. com, 2010.
- [3] Mihaela Cardei and Jie Wu. Coverage in wireless sensor networks. *Handbook of Sensor Networks*, pages 422–433, 2004.
- [4] Poondi Srinivasan Pandian, Kadavath Peedikayil Safeer, Pragati Gupta, DT Shakunthala, BS Sundersheshu, and Vinod Chidambar Padaki. Wireless sensor network for wearable physiological monitoring. *Journal of networks*, 3(5) :21–29, 2008.
- [5] JeongGil Ko, Chenyang Lu, Mani B Srivastava, John A Stankovic, Andreas Terzis, and Matt Welsh. Wireless sensor networks for healthcare. *Proceedings of the IEEE*, 98(11) :1947–1960, 2010.
- [6] Jaspal S Sandhu, Alice M Agogino, Adrian K Agogino, et al. Wireless sensor networks for commercial lighting control : decision making with multi-agent systems. In *AAAI workshop on sensor networks*, volume 10, pages 131–140, 2004.
- [7] Edgar H Callaway Jr. *Wireless sensor networks : architectures and protocols*. CRC press, 2003.
- [8] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, and Taieb Znati. *Wireless sensor networks : technology, protocols, and applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [9] Guiling Wang, Guohong Cao, Tom La Porta, and Wensheng Zhang. Sensor relocation in mobile sensor networks. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 4, pages 2302–2312. IEEE, 2005.
- [10] Zack Butler and Daniela Rus. Event-based motion control for mobile-sensor networks. *Pervasive Computing, IEEE*, 2(4) :34–42, 2003.
- [11] Petter Ogren, Edward Fiorelli, and Naomi Ehrich Leonard. Cooperative control of mobile sensor networks : Adaptive gradient climbing in a

- distributed environment. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 49(8) :1292–1302, 2004.
- [12] Lang Tong, Qing Zhao, and Srihari Adireddy. Sensor networks with mobile agents. In *Military Communications Conference, 2003. MILCOM'03. 2003 IEEE*, volume 1, pages 688–693. IEEE, 2003.
 - [13] Mo Li and Baijian Yang. A survey on topology issues in wireless sensor network. In *ICWN*, page 503, 2006.
 - [14] Jilei Liu and Baochun Li. Distributed topology control in wireless sensor networks with asymmetric links. In *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM'03. IEEE*, volume 3, pages 1257–1262. IEEE, 2003.
 - [15] Tapiwa M Chiwewe and Gerhard P Hancke. A distributed topology control technique for low interference and energy efficiency in wireless sensor networks. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 8(1) :11–19, 2012.
 - [16] Ning Li, Jennifer C Hou, and Lui Sha. Design and analysis of an mst-based topology control algorithm. In *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, volume 3, pages 1702–1712. IEEE, 2003.
 - [17] Li Li, Joseph Y Halpern, Paramvir Bahl, Yi-Min Wang, and Roger Wattenhofer. A cone-based distributed topology-control algorithm for wireless multi-hop networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 13(1) :147–159, 2005.
 - [18] Douglas M Blough, Mauro Leoncini, Giovanni Resta, and Paolo Santi. The k-neigh protocol for symmetric topology control in ad hoc networks. In *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 141–152. ACM, 2003.
 - [19] Wen-Zhan Song, Xiang-Yang Li, Ophir Frieder, and Weu Zhao Wang. Localized topology control for unicast and broadcast in wireless ad hoc networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 17(4) :321–334, 2006.
 - [20] Richa Singh. Energy efficient coverage for mobile sensor network. *International Journal of Computer Applications*, 55(2) :41–47, 2012.
 - [21] Ahmad Abed Alhameed Alkhatib and Gurbinder Singh Baicher. Wireless sensor network architecture. In *2012 International Conference on Computer Networks and Communication Systems (CNCs 2012)*, 2012.
 - [22] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 19(2) :40–50, 2002.
 - [23] Jeffery Mehlman. Cross-layer design : A case for standardization. *Jmehlman@stanford.edu*.

- [24] Anna Hac. *Wireless sensor network designs*. John Wiley & Sons West Sussex, England, 2003.
- [25] Alan Mainwaring, David Culler, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, and John Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 88–97. ACM, 2002.
- [26] Alberto Cerpa, Jeremy Elson, Deborah Estrin, Lewis Girod, Michael Hamilton, and Jerry Zhao. Habitat monitoring : Application driver for wireless communications technology. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 31(2 supplement) :20–41, 2001.
- [27] Bang Wang. *Coverage control in sensor networks*. Springer, 2010.
- [28] Yi Zou and Krishnendu Chakrabarty. A distributed coverage-and-connectivity-centric technique for selecting active nodes in wireless sensor networks. *Computers, IEEE Transactions on*, 54(8) :978–991, 2005.
- [29] Zongheng Zhou, Samir R Das, and Himanshu Gupta. Variable radii connected sensor cover in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 5(1) :8, 2009.
- [30] Zheng Fang and Jie Wang. Convex combination approximation for the min-cost wsn point coverage problem. In *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*, pages 188–199. Springer, 2008.
- [31] Santpal S Dhillon, Krishnendu Chakrabarty, and SS Iyengar. Sensor placement for grid coverage under imprecise detections. In *Information Fusion, 2002. Proceedings of the Fifth International Conference on*, volume 2, pages 1581–1587. IEEE, 2002.
- [32] Santpal Singh Dhillon and Krishnendu Chakrabarty. *Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks*, volume 3. IEEE, 2003.
- [33] Xiaochun Xu and Sartaj Sahni. Approximation algorithms for sensor deployment. *Computers, IEEE Transactions on*, 56(12) :1681–1695, 2007.
- [34] Jie Wang and Ning Zhong. Efficient point coverage in wireless sensor networks. *Journal of Combinatorial Optimization*, 11(3) :291–304, 2006.
- [35] Jae-Hyun Seo, Yong-Hyuk Kim, Hwang-Bin Ryou, and Seok-Joong Kang. A genetic algorithm for sensor deployment based on two-dimensional operators. In *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Applied computing*, pages 1812–1813. ACM, 2008.
- [36] Qishi Wu, Nageswara SV Rao, Xiaojiang Du, S Sitharama Iyengar, and Vijay K Vaishnavi. On efficient deployment of sensors on planar grid. *Computer Communications*, 30(14) :2721–2734, 2007.
- [37] Yong Xu and Xin Yao. A ga approach to the optimal placement of sensors in wireless sensor networks with obstacles and preferences. In

- Consumer Communications and Networking Conference, 2006. CCNC 2006. 3rd IEEE*, volume 1, pages 127–131. IEEE, 2006.
- [38] Chunhua Zhao, Zhiqiang Yu, and Peng Chen. Optimal deployment of nodes based on genetic algorithm in heterogeneous sensor networks. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on*, pages 2743–2746. IEEE, 2007.
 - [39] İ Kuban Altınel, Necati Aras, Evren Güney, and Cem Ersoy. Binary integer programming formulation and heuristics for differentiated coverage in heterogeneous sensor networks. *Computer Networks*, 52(12) :2419–2431, 2008.
 - [40] Krishnendu Chakrabarty, S Sitharama Iyengar, Hairong Qi, and Eungchun Cho. Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks. *Computers, IEEE Transactions on*, 51(12) :1448–1453, 2002.
 - [41] Maulin Patel, R Chandrasekaran, and S Venkatesan. Energy efficient sensor, relay and base station placements for coverage, connectivity and routing. In *Performance, Computing, and Communications Conference, 2005. IPCCC 2005. 24th IEEE International*, pages 581–586. IEEE, 2005.
 - [42] Sasha Slijepcevic and Miodrag Potkonjak. Power efficient organization of wireless sensor networks. In *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*, volume 2, pages 472–476. IEEE, 2001.
 - [43] Mihaela Cardei and Ding-Zhu Du. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization. *Wireless Networks*, 11(3) :333–340, 2005.
 - [44] Mihaela Cardei, My T Thai, Yingshu Li, and Weili Wu. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 3, pages 1976–1984. IEEE, 2005.
 - [45] Dimitrios Zorbas, Dimitris Glynos, Panayiotis Kotzanikolaou, and Christos Douligeris. Solving coverage problems in wireless sensor networks using cover sets. *Ad Hoc Networks*, 8(4) :400–415, 2010.
 - [46] Dimitrios Zorbas, Dimitris Glynos, Panayiotis Kotzanikolaou, and Christos Douligeris. B {GOP} : An adaptive algorithm for coverage problems in wireless sensor networks. In *13th European Wireless Conference, EW*, 2007.
 - [47] Qun Zhao and Mohan Gurusamy. Lifetime maximization for connected target coverage in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 16(6) :1378–1391, 2008.
 - [48] M. Cardei, I. Cardei. Energy efficient connected coverage in wireless sensor networks. *Int. J. Sen. Netw.*, 3(3) :201210, 2008.

- [49] Neeraj Jaggi and Alhussein A Abouzeid. Energy-efficient connected coverage in wireless sensor networks. In *Proceedings of 4th Asian International Mobile Computing Conference, Kolkata, India*, pages 77–86. Citeseer, 2006.
- [50] Zoë Abrams, Ashish Goel, and Serge Plotkin. Set k-cover algorithms for energy efficient monitoring in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd international symposium on Information processing in sensor networks*, pages 424–432. ACM, 2004.
- [51] Piotr Berman, Gruia Calinescu, Chintan Shah, and Alexander Zelikovskiy. Power efficient monitoring management in sensor networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE*, volume 4, pages 2329–2334. IEEE, 2004.
- [52] Dumitru Brinza and Alexander Zelikovskiy. Deeps : Deterministic energy-efficient protocol for sensor networks. In *Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, 2006. SNPD 2006. Seventh ACIS International Conference on*, pages 261–266. IEEE, 2006.
- [53] Akshaye Dhawan and Sushil K Prasad. Energy efficient distributed algorithms for sensor target coverage based on properties of an optimal schedule. In *High Performance Computing-HiPC 2008*, pages 269–281. Springer, 2008.
- [54] Sushil K Prasad and Akshaye Dhawan. Distributed algorithms for lifetime of wireless sensor networks based on dependencies among cover sets. In *High Performance Computing-HiPC 2007*, pages 381–392. Springer, 2007.
- [55] Mihaela Cardei, Jie Wu, Mingming Lu, and Mohammad O Pervaiz. Maximum network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges. In *Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, 2005.(WiMob'2005), IEEE International Conference on*, volume 3, pages 438–445. IEEE, 2005.
- [56] Akshaye Dhawan, Chinh T Vu, Alexander Zelikovskiy, Yingshu Li, and Sushil K Prasad. Maximum lifetime of sensor networks with adjustable sensing range. In *Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, 2006. SNPD 2006. Seventh ACIS International Conference on*, pages 285–289. IEEE, 2006.
- [57] Mingming Lu, Jie Wu, Mihaela Cardei, and Minglu Li. Energy-efficient connected coverage of discrete targets in wireless sensor networks. In *Networking and Mobile Computing*, pages 43–52. Springer, 2005.
- [58] Dimitrios Zorbas and Christos Douligeris. Satisfying coverage and connectivity in bandwidth constrained sensor networks. In *Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009. 9th International Symposium on*, pages 390–395. IEEE, 2009.

- [59] Maggie Xiaoyan Cheng, Lu Ruan, and Weili Wu. Achieving minimum coverage breach under bandwidth constraints in wireless sensor networks. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 4, pages 2638–2645. IEEE, 2005.
- [60] Maggie X Cheng, Lu Ruan, and Weili Wu. Coverage breach problems in bandwidth-constrained sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 3(2) :12, 2007.
- [61] Salvatore Rampone. Probability-driven greedy algorithms for set cover. In *Soft Computing : Data analysis*, pages 215–220. New Logics for the New Economy, 2007.