



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE IBN KHALDOUN - TIARET

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ PAR

HOUARI BOUMEDIENE DOUMA
SALAH MAHLOUL

POUR L'OBTENTION DU

DIPLÔME DE MASTER EN INFORMATIQUE

SPÉCIALITÉ : RÉSEAUX ET TÉLÉÉCOMMUNICATIONS

La simulation d'un protocole de
couverture de zone dans
les réseaux de capteurs sans fil

Abdelmalek BENGHANI
Adda BOUALEM
Samir NESSANE

MCB
MCB
MAA

Président.
L'encadreur.
Examineur.

27 Juin 2022

REMERCIEMENTS

Avant tout, on remercie **ALLAH** Tout-Puissant de nous avoir donné le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur **Dr. Adda BOUALEM**, Ibn Khaldoun, Tiaret, pour avoir dirigé ce travail avec abnégation et disponibilité.

Ses conseils nous ont été d'un grand apport pour accomplir ce mémoire.

Nous adressons mes plus vifs remerciements aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail :

M. BENGHENI Abdelmalek Maitre de conférence, et **M. NESSANE Samir**, Maitre assistant de l'université Ibn Khaldoun.

Je présente mes remerciements :

À

Mes chers parents, mes frères
pour leur soutien et leurs encouragements durant mon parcours
universitaire.

À

Ma femme.

À

Mes Amis.

À

Tous mes professeurs
qu'il soient du primaire, du secondaire ou du supérieur.

Douma houari boumediene

Je présente mes remerciements à mes chers parents mon père que Dieu accorde le repos à son âme. et ma mère, à mes frères (Mohamed, Adda, Sid Ahmed, Djamel) et mes soeurs avec leurs maris et leurs enfants : (Khiera, Mohamed, Izzedine, Hamid, Bouchra, Halima, Kadi, Rania, Rayyan, Nazim, Khalida, Fatima Zohra, ma femme Belaid F/Zohra, mes enfants (Anes Abdelleh, Sadjia et Mohamed Riadh). Sans oublier l'oncle et la tante.(Khaled, Farida, Achour, Saad, Abed, Abdelkader que Dieu accorde le repos à son âme)

Je leur suis infiniment reconnaissante pour leur soutien moral et leur encouragement sans lesquels je n'aurais pas pu tenir bon devant les difficultés que j'ai rencontrées.

Mehloul salah dine

Résumé

Dans ce mémoire de fin d'études, nous avons met l'accent sur le problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), et présenter un état de l'art, un peu détaillé sur les solutions proposées dans la littérature, se focaliser sur la simulation d'un modèle proposé dans la littérature et finirai par une conclusion résumant le contenu de notre travail.

Mots-clés : Réseaux de capteurs sans fil, Couverture, Connectivité.

Abstract

In this thesis, we focused on the problem of coverage in wireless sensor networks (WSN), and present a state of the art, a little detailed on the solutions proposed in the literature, focus on the simulation of a model proposed in the literature and end with a conclusion summarizing the content of our work.

Keywords : Wireless sensor networks, Coverage, Connectivity.

المخلص

في هذه المنكرة ، ركزنا على مشكلة التغطية في شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSN) ، وقمنا حالة من الفن ، ومفصلة قليلاً عن الطول المقترحة في الأدبيات ، والتركيز على محاكاة نموذج مقترح في الأدبيات و تنتهي بخاتمة تلخص محتوى عملنا.

الكلمات المفتاحية: شبكات الاستشعار اللاسلكية ، التغطية ،

Table des figures

1.1	Architecture générale d'un RCSF[1]	14
1.2	Architecture physique d'un nœud capteur statique/mobile	15
1.3	Classification des réseaux sans fil	16
1.4	Le modèle de réseau mobile avec infrastructure	17
1.5	Le changement de la topologie des réseaux ad-hoc	18
1.6	Réseau en mode ad-hoc	19
2.1	Types de couverture.	26
2.2	Quelques domaines utilisés pour traiter le problème de couverture dans les RCSFs	28
2.3	Ordonnancement d'activités dans un réseau de capteurs [2] (a) Tous les capteurs sont actifs. (b)Seule une partie est nécessaire à couvrir	29
2.4	Diagramme de Voronoi[2]	30
2.5	Triangulation de Delaunay[3]	30
2.6	Une surface divisée en huit domaines .[3]	32
2.7	Stratégies de couverture[4]	33
4.1	Principe générale de fonctionnement du AADDC-RCM	45
4.2	Le temps final en fonction de nombres des nœuds de capteur.	47
4.3	L'interface principale	48
4.4	Emplacements des 2 nœuds de capteur sur une surface de $50 \times 50m^2$.	49
4.5	Emplacements des 4 nœuds de capteur sur une surface de $50 \times 50m^2$.	49
4.6	Emplacements des 6 nœuds de capteur sur une surface de $50 \times 50m^2$.	49
4.7	Emplacements des 8 nœuds de capteur sur une surface de $50 \times 50m^2$.	50
4.8	Emplacements des 10 nœuds de capteur sur une surface de $50 \times 50m^2$.	50

Table des matières

Résumé	5
Introduction générale	10
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	13
1.1 Introduction	14
1.2 Un Capteur	14
1.3 L'Architecture d'un nœud de capteur	14
1.4 Un Réseau de capteurs	16
1.4.1 Définition	16
1.4.2 Réseaux cellulaires (avec infrastructure)	16
1.4.3 Réseaux ad-hoc (sans infrastructure)	17
1.5 Caractéristiques des réseaux AD-HOC	18
1.6 Mécanismes utilisés dans réseaux de capteur sans fil	19
1.7 Problématiques des réseaux de capteur sans fil	20
1.8 Conclusion	21
2 État de L'art sur : La couverture de zone et la connectivité	22
2.1 Introduction	23
2.2 Définition de la couverture	23
2.3 Définition de la connectivité	24
2.4 Types de couverture	24
2.5 Types de connectivité dans les RCSF	26
2.6 Relation entre la couverture et la connectivité	27
2.7 Classification des solutions de la couverture	27
2.7.1 Solutions basées sur des approches protocolaires	28
2.7.2 Solutions basées sur des méthodes géométriques	29
2.7.2.1 Solution centralisée basée sur le diagramme de Voronoï	31
2.7.2.2 Le score de la Triangulation de Delaunay (DT-score)	31

2.7.2.3	Déploiement incrémental	31
2.7.3	Solutions basées sur des méthodes analytiques	31
2.7.3.1	Heuristique de "Most Constrained-Minimally Constraining"	31
2.7.3.2	Heuristique de ensembles dominants disjoints (Disjoint Dominating Sets)	32
2.7.3.3	Programmation linéaire en nombre entier ba- sée sur la grille (ILP based grid)	32
2.7.3.4	Programmation linéaire en nombre entier ba- sée sur la méthode des points d'intersections	33
2.8	Classification par stratégies de couverture	33
2.8.1	Couverture avec déploiement déterministe	33
2.8.2	Couverture avec un déploiement aléatoire	34
2.9	Classification par algorithmes de couverture	34
2.9.1	Approches centralisées	34
2.9.2	Approches distribuées	35
2.9.3	Approches hybrides	35
2.9.4	Algorithmes de placement	36
2.10	Conclusion	37
3	Conception & Réalisation	38
3.1	Introduction	39
3.2	Principe générale de fonctionnement du (AADDC-RCM) . . .	39
3.3	Conclusion	42
4	Simulation	43
4.1	Introduction	44
4.2	Simulation et analyse de performances	44
4.3	Étapes de fonctionnement du protocole AADDC-RCM	45
4.4	Analyse de résultats	47
4.5	Conclusion	50
	Bibliographie	56

Liste des abréviations

2D	Deux Dimensions
AADDC-RCM	Algorithme Anti-floc Distribués Pour La Couverture
AGP	Art Gallery Problem
Aol	Area Of Intesest (Zone D'intéret)
APO	Wireless Wide Area Network
BBO	Big Data Aggregation
BDA	Biogeography-Based Optimization
CSA	Cuckoo Search. Algorithm
CSAPO	Clonal Selection Artificial Physics Optimisation Algorithm
OEP	Differentiated Deployment Algorithm
GPS	Global Positioning System
ILP	Integer Linear Program
LBNL	Integral Membrane Proteins
IPM	Mobile Ad Hoc Networks
MANET	Lawrence Brekely National Laboratory
NAM	Network Animator
NS	Nanoseconds
NS-2	Network Simulator Version 2
WSN	Optimum Energy Path
OPNET	Optimum Network Performance
PFDA	Réseau De Capteurs Sans Fil
RCSF	Réseaux De Capteurs Vidéo Sans Fil
RCVSF	Potential Field Algorithm
SB	Station De Base
TOSSIM	Tinyos Sensor Network
VFA	Virtual Force Algorithm
VPA	Virtual Path Algorithm
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWAN	Wireless Sensors Network
DDA	Artificial Physics Optimization

Introduction générale

Introduction générale

Durant ces dernières années, les technologies de communications sans fil se sont introduites dans différents niveaux de la société : les entreprises, les hôpitaux, les usines, dans les domiciles, dans les téléphones et autres équipements domestiques, . . . Les innovations technologiques dans la miniaturisation et la communication sans fil ont permis l'avènement des réseaux de capteurs sans fil. Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) ou Wireless Sensor Networks (WSN) en anglais sont considérés comme un type particulier de réseaux ad hoc. Les nœuds de ce type de réseaux consistent en un grand nombre de capteurs capables de l'auto organisé, de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome.

Le sujet de ce mémoire s'articule autour de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). La couverture est une question de recherche fondamentale dans RCSF, car elle peut être considérée comme la mesure de la qualité de service de la fonction de détection pour un réseau de capteurs sans file.

Par exemple, dans une application de surveillance d'une forêt, peut demander dans quelle mesure le réseau peut observer une zone donnée et quelles sont les chances qu'un incendie dans un emplacement spécifique de la forêt sera détecté dans un laps de temps donné. En outre, les formulations de couverture peut tenter de trouver de faibles points dans le champ du capteur sans fil et suggèrent un futur déploiement ou régimes de reconfiguration pour améliorer la performance de la couverture. Dans la pratique ; la couverture est incarnée habituellement dans la réponse de deux questions de base :

- Comment évaluer le taux de performance de la couverture quand les nœuds. de capteurs sont déployés dans une zone de surveillance ;
- Comment améliorer les performances de couverture lorsque le réseau de capteurs sans fil peut ne pas satisfaire efficacement les exigences de l'application.

Pour offrir une couverture garantie, le point essentiel est de résoudre le problème de couverture avec les ressources disponibles suffisantes et peut-être d'intégrer des optimisations. Parmi les nombreux défis lors de la conception d'un système de couverture efficace, le maintien de la connectivité et de maximiser la durée de vie du réseau se distinguent comme les défis critiques. Ce mémoire est structuré en 04 chapitres :

- Chapitre 01 : ce chapitre représente un aperçu général sur les réseaux de capteurs sans fil, et notamment sur leur architecture, classifications.
- Chapitre 02 : présente un état de l'art sur la couverture, la connectivité

et les stratégies proposées pour ce faire.

- Chapitre 03 : ce chapitre représente une description sur le protocole utilisé.
- Chapitre 04 : Dans ce chapitre nous allons simuler un protocole de couverture, analyser les résultats obtenus et montrer son efficacité en terme de couverture de zone.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Un Réseau de Capteurs sans Fil (RCSF), ou Wireless Sensor Network (WSN), est un ensemble d'entités déployées de façon à couvrir une zone d'intérêt. Ces entités sont capables d'opérer en toute autonomie afin de collecter, traiter et envoyer des données relatives à leur environnement vers une Station de Base (SB). Les capteurs disposent de faibles capacités énergétiques et communiquent entre eux via des liaisons sans fil. La Figure (1.1) illustre l'architecture générale d'un RCSF.

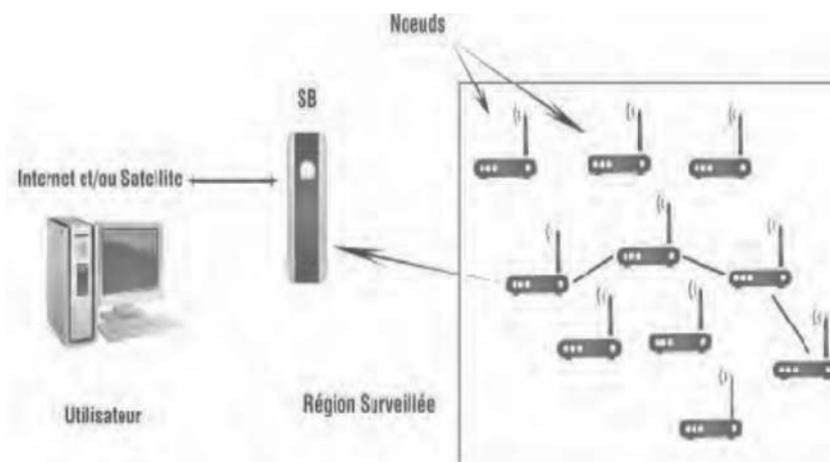


FIGURE 1.1 – Architecture générale d'un RCSF[1]

1.2 Un Capteur

Un capteur est un dispositif destiné à mesurer une donnée environnementale comme la température, ou même capturer une image par exemple, et de la transformer en information utilisable puis de la transmettre à une unité de traitement de façon analogique ou numérique.

Ces capteurs doivent donc être connectés à un appareil capable d'en interpréter la mesure, puis, selon l'usage souhaité permettre l'utilisation [5].

1.3 L'Architecture d'un nœud de capteur

Généralement, un nœud capteur est composé de quatre unités principales qui sont données sur la figure (1.2) :

- L'unité d'acquisition qui est composée d'un (ou plusieurs) capteur qui mesure les paramètres environnementaux et d'un convertisseur

Analogique Numérique qui convertit l'information relevée afin de la transmettre à l'unité de traitement [6].

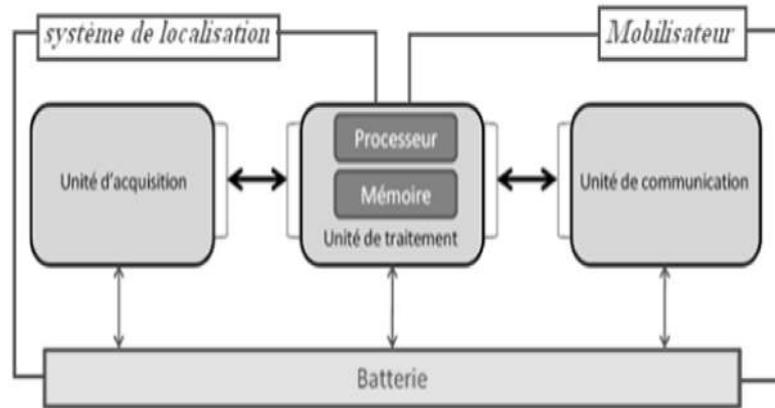


FIGURE 1.2 – Architecture physique d'un nœud capteur statique/mobile [7]

- L'unité de traitement qui se compose d'un processeur et d'une mémoire intégrant un système d'exploitation spécifique (par exemple, TinyOS (Tiny Operating System)) [8]. Cette unité possède deux interfaces ; une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de communication.

Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de communication. Cette unité est chargée aussi d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le nœud capteur avec d'autres nœuds capteurs. Elle peut aussi analyser les données capturées.

- L'unité de communication qui est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio.
- L'unité d'énergie munie d'une batterie pour alimenter tous ses composants. Cependant, à cause de sa taille réduite, cette batterie est limitée et généralement irremplaçable. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des nœuds capteurs.

Il existe des nœuds capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels comme un système de positionnement GPS (Global Positioning System) pour avoir les informations sur la localisation et un mobilisateur

(mobiliser) lui permettant le déplacement.

1.4 Un Réseau de capteurs

1.4.1 Définition

Un réseau sans fil (Wireless network) est un réseau où au moins deux nœuds peuvent avoir une communication sans liaison filaire. Ces réseaux de communications permettent aux utilisateurs de profiter de tous les services traditionnels des réseaux indépendamment de leurs positions géographiques. Les réseaux sans fil peuvent avoir une classification selon deux critères.

Le premier est la zone de couverture du réseau. Au vu de ce critère il existe quatre catégories : les réseaux personnels(WPAN), les réseaux locaux(WLAN), le réseau métropolitain(WMAN) et les réseaux étendus(WWAN). Le second critère est l'infrastructure on peut diviser les réseaux sans fils en : réseaux avec infrastructures(cellulaire) et réseaux sans infrastructure(Ad hoc)[9], comme on le voit dans l'illustration de la figure (1.3) suivante :

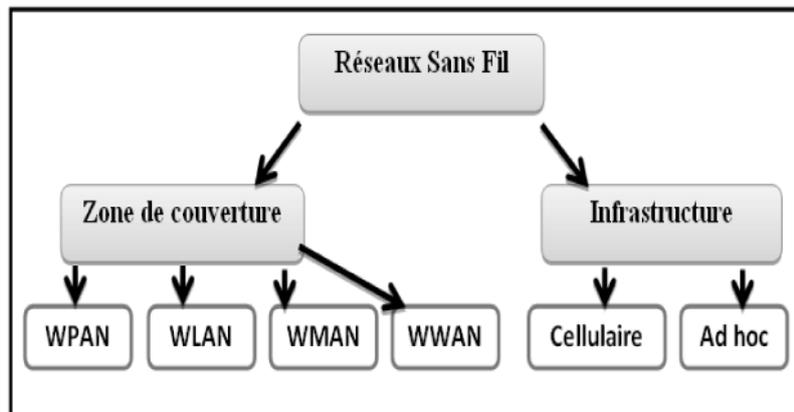


FIGURE 1.3 – Classification des réseaux sans fil
[10]

1.4.2 Réseaux cellulaires (avec infrastructure)

Dans les réseaux avec infrastructure, il existe une entité centrale, appelée coordinateur ou station de base (SB) qui a pour rôle d'orchestrer toute l'activité du réseau. Comme illustré dans la figure (1.4), les réseaux avec infrastructure sont partitionnés en cellules, encore appelées zones.

Chaque zone dispose d'un coordinateur appelé station de base qui joue le rôle de l'entité centrale. Toutes les communications passent par la station de base. La particularité de cette famille de réseau est que toutes les communications passent obligatoirement par la station de base.

Le système de communication est fondu essentiellement sur l'utilisation de réseaux filaires mais aussi de station de base, avec une longue portée, pour couvrir l'ensemble des nœuds mobiles. Ainsi, les réseaux avec infrastructure nécessitent une importante logistique pour leur déploiement [11].

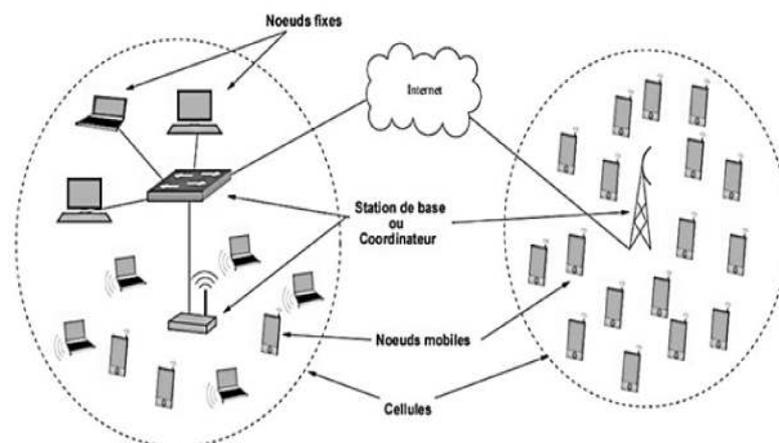


FIGURE 1.4 – Le modèle de réseau mobile avec infrastructure [10]

1.4.3 Réseaux ad-hoc (sans infrastructure)

Un réseau mobile ad-hoc, appelé généralement Mobile Ad hoc Network (MANET), est un groupe de nœuds mobiles qui se déplacent dans n'importe quelle zone de manière autonome et coopérative sans utiliser d'infrastructure préexistante ou de gestion centralisée. Les "ondes radio" se propageant entre les nœuds mobiles sont le seul moyen de communication. Une fois qu'un groupe de nœuds mobiles se trouve à portée radio les uns des autres, le réseau se forme spontanément mais temporairement. Il existe deux modes de communication entre deux nœuds mobiles, en fonction de la distance qui les sépare. Lorsque deux nœuds sont à portée radio et peuvent communiquer directement, ce mode est appelé transmission ad hoc. En revanche, dans le cas où deux nœuds ne sont pas à portée, ils doivent utiliser d'autres nœuds mobiles comme relais pour garantir la communication et acheminer les paquets vers leur destination, un schéma connu sous le nom de transmission multi-sauts.[12].

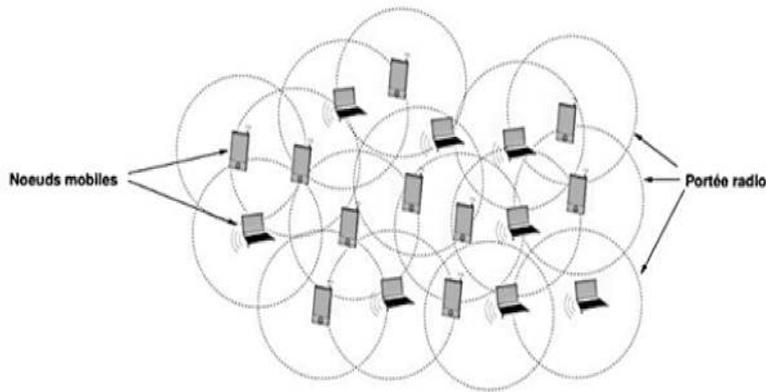


FIGURE 1.5 – Le changement de la topologie des réseaux ad-hoc [10]

Un réseau ad-hoc est un réseau sans fil auto-configurable. Lorsque deux machines mobiles ou plus se retrouvent dans le même secteur géographique, elles doivent se reconnaître pour pouvoir s'échanger des données.

Le réseau doit se configurer automatiquement, périodiquement ou à la demande pour assurer la liaison entre ces machines. Un réseau ad-hoc doit être facilement déployé, les nœuds peuvent rejoindre et quitter le réseau de façon totalement dynamique sans devoir en informer le réseau et si possible sans perturber les communications entre les autres nœuds du réseau.

La topologie des réseaux ad-hoc est dynamique et décentralisée. Elle peut changer aléatoirement, et les unités mobiles sont libres de se déplacer arbitrairement. De ce fait, la déconnexion de ces unités est très fréquente.

1.5 Caractéristiques des réseaux AD-HOC

Les réseaux mobiles ad-hoc sont caractérisés par ce qui suit :

- **Une topologie dynamique** : Les unités mobiles du réseau peuvent se déplacer librement et arbitrairement. Par conséquent, la topologie du réseau peut changer de manière rapide et aléatoire à des moments imprévisibles.
- **Une bande passante limitée** : L'une des caractéristiques essentielles d'un réseau basé sur la communication sans fil est l'utilisation d'un support de communication partagé. Ce partage permet une bande passante

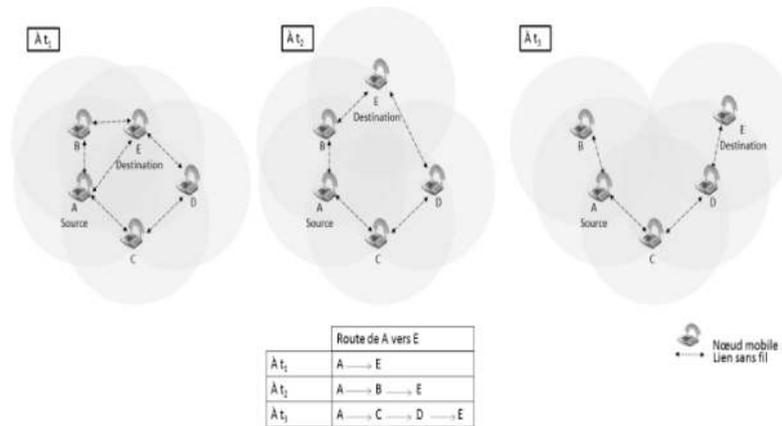


FIGURE 1.6 – Réseau en mode ad-hoc
[10]

modérée réservée aux hébergeurs.

- **Des contraintes d'énergie** : L'hôte mobile est alimenté par une source d'alimentation indépendante, telle qu'une batterie ou une autre source de consommation. Le paramètre énergétique doit être pris en compte dans tout contrôle effectué par le système.
- **Une sécurité physique limitée** : Les réseaux mobiles ad hoc sont plus sensibles aux paramètres de sécurité que les réseaux filaires traditionnels. Cela se traduit par des contraintes et limitations physiques, ce qui signifie que le contrôle sur les données transmises doit être minimisé.
- **L'absence d'infrastructure** : Les réseaux ad-hoc se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructures pré-existante et de tout genre d'administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue.

1.6 Mécanismes utilisés dans réseaux de capteur sans fil

Afin de réaliser les caractéristiques précédentes, des nouveaux mécanismes de communications, d'architectures et de protocoles doivent être développés. Les mécanismes typiques considérés dans les RCSFs sont [12] :

- **Communication multi-sauts** : Pour les communications à longue distance, l'utilisation des nœuds intermédiaires pour transmettre les paquets, peut induire une réduction de l'énergie exigée.
- **Utilisation efficace d'énergie** : C'est là un mécanisme clé pour offrir et soutenir sur une durée longue l'opérationnalité du réseau.

-
- **Auto-configuration** : Ce mécanisme est employé dans différents aspects des RCSFs. Le nœud capteur devrait être capable d'adapter ses paramètres de service pour tenir compte des défaillances des autres nœuds, des obstacles et de l'ajout de nœuds au réseau.
 - **Collaboration et traitement dans le réseau** : Selon l'application, il est parfois exigé qu'un groupe de nœuds de capteurs interagissent afin de détecter un événement ou faire un traitement plus complet d'informations.

La considération des approches des offres de traitement dans le réseau comme l'agrégation de données, qui réduisent la quantité de données transmises et par conséquent améliore l'efficacité énergétique du réseau.

- **Data-centric** : dans des applications communes, les nœuds de capteurs sont déployés d'une manière redondante, pour protéger le réseau contre des défaillances de nœuds. Dans une approche " data-centric ", l'identité d'un nœud particulier fournissant des données devient non pertinente. Le plus important, ce sont les réponses générales que le RCSFs offre à l'utilisateur.

1.7 Problématiques des réseaux de capteur sans fil

Le problème de la mobilité des nœuds pose plusieurs challenges à surmonter, comme la connectivité, la couverture, la consommation d'énergie et bien d'autres paramètres. Toutefois, des études récentes ont montré les apports de la mobilité [13, 14].

Plutôt que de compliquer les problèmes cités ci-dessus, il a été démontré que l'introduction des entités mobiles peut résoudre quelques-uns des problèmes des RCSF.

En plus, la mobilité permet aux nœuds capteurs de détecter et d'acheminer les phénomènes mobiles tels que les gaz chimiques, les véhicules, et les soldats dans un champ de bataille. D'autre part, la mobilité des capteurs influe beaucoup sur l'acheminement de l'information dans les RCSF à cause du changement fréquent de la topologie qui pose des problèmes, comme la perte de connectivité entre un nœud capteur et ses voisins et la surcharge générée par la redondance des informations acheminées dans le réseau.

En effet, un RCSF peut utiliser une approche simple basée sur le routage

géographique qui permet le passage à l'échelle et garantit une progression positive des paquets vers les nœuds collecteurs du réseau. Ainsi, chaque nœud capteur transmet tout paquet reçu au voisin le plus proche du nœud collecteur.

Puisqu'il n'y a aucune information de routage à maintenir, autre que la table des nœuds voisins, les chemins de routage s'adaptent à tout changement dans la topologie d'un RCSF ([15, 16, 17]).

1.8 Conclusion

Les progrès connus récemment dans le domaine des technologies sans fil, ont permis l'apparition des nouveaux types de réseaux de capteurs. Les propriétés de ce type de réseaux en termes de flexibilité, coût réduit, et facilité de déploiement offrent de nombreuses possibilités de développement dans divers domaines.

Dans ce chapitre, nous avons évoqué quelques problèmes des réseaux de capteurs sans fil. Cependant, ce domaine tente à développer de nouvelles solutions aux problèmes dont nous avons discutés, en particulier celle de la couverture. La couverture est l'un des problèmes majeurs des réseaux de capteurs qui a pour objectif de surveiller une zone ou un ensemble de cibles le plus longtemps possible, comme il est la clé de la majorité des problèmes de réseaux de capteurs. Le chapitre suivant se focalise sur l'un des défis majeurs des réseaux de capteur qui est la couverture.

Chapitre 2

État de L'art sur : La couverture de zone et la connectivité

2.1 Introduction

Contrairement aux technologies de réseau traditionnelles, RCSF n'intègre que des unités limitées, équipées d'unités de communication sans fil et de modules de détection.

L'un des principaux enjeux des réseaux de capteurs est la couverture, qui consiste à observer de façon continue et efficace des phénomènes ou événements susceptibles de se produire au sein d'une zone géographique. Problème de couverture, presque un problème de base Tous les types d'applications dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN) ont été étudiés depuis plus d'une décennie. La couverture d'une zone géographique par un réseau de capteurs s'attache à répondre aux questions suivantes :

- Comment couvrir une zone géographique avec un ensemble minimal des nœuds de capteurs ?
- Comment garantir la couverture pendant un temps maximal pour des objectifs applicatifs ?
- Dans quelles positions doit-on placer/déployer les nœuds de capteurs pour garantir une couverture maximale de la zone d'intérêt ?

La couverture est le cœur des applications des réseaux de capteurs car elle mesure la relation entre ce réseau et l'environnement. Bien entendu, l'estimation quantitative de cette couverture dépend fortement des besoins de l'application, raison pour laquelle plusieurs concepts de couverture sont apparus.

La couverture d'un réseau de capteurs représente la qualité de la surveillance que le réseau peut fournir, par exemple, à quel point une zone d'intérêt est surveillée par des capteurs, et avec quelle efficacité un réseau de capteurs peut assurer son rôle principal. Il est important de comprendre comment la couverture d'un réseau de capteurs dépend de divers paramètres de réseau afin de mieux concevoir et utiliser les réseaux de capteurs pour différents scénarios d'application. La couverture assurée par un réseau de capteurs peut être assimilée à la qualité de service [18].

2.2 Définition de la couverture

La couverture est une mesure de performance très importante. Il reflète la façon dont une zone donnée est surveillée (contrôlée), c'est-à-dire comment chaque point de la zone surveillée est observé et suivi par tous les nœuds de capteurs. Par conséquent, le concept de couverture dans RCSF peut être

considéré comme une mesure de la qualité de service.[18, 19]

Certaines applications peuvent exiger une couverture fortement et totale , Par exemple, c'est le cas de la surveillance critique d'une zone sur frontières ,zone des volcans , etc.

dans ce type d'applications, un événement se produit en un point quelconque de la zone surveillée par les capteurs, il soit détecté au moins par un capteur donné. Les applications telles que la surveillance animale, la mesure de température à l'intérieur d'un bâtiment requièrent des degrés de couverture plus faibles.

D'autres applications comme la détection de mouvement fonctionnent généralement avec un degré de couverture dynamiquement en fonction des zones de détection en alerte. Par conséquent, la couverture d'une zone donnée doit être prise en considération dans la conception et le déploiement de certaines applications des RCSFs.

2.3 Définition de la connectivité

Deux nœuds d'une RCSF sont dits connectés si et seulement s'ils peuvent communiquer directement ou indirectement. Le RCSF est connecté s'il existe au moins une route entre chaque nœud du réseau et la station de base. Ainsi, à partir de ces deux définitions, on peut dire que la connectivité est donc essentiellement dépendante de l'existence de routes. Par conséquent, il est sujet à des changements de topologie généralement dus à des pannes de nœud, à la mobilité, etc. Ces changements de topologie peuvent entraîner la perte des liaisons de communication, l'isolement des nœuds, des partitions réseau, etc. Comme la couverture, la connectivité dans RCSF est considérée comme un paramètre de mesure de performance très important, en particulier dans le cas des applications RCSF décrites ci-dessus. Par conséquent, afin de garantir correctement toutes les fonctions de ces applications,

2.4 Types de couverture

D'une manière générale, la couverture dans les WSN est classée en trois catégories, la couverture de surface/zone, couverture par barrières et la couverture de cibles. Chaque catégorie peut être divisée entre deux types, couver-

ture statique ou dynamique. On distingue le type de couverture permanente (tout le temps de la durée de vie du réseau), ou périodique (quelques périodes de temps).

À l'instar de la connectivité, il est aussi possible d'introduire la notion de k -couverture qui indique que chaque point de la zone à observer l'est par au moins k capteurs. Naturellement, certifier la couverture d'une zone à partir des capteurs dépend du modèle de couverture de chaque unité. Les algorithmes de certification reposent souvent sur la position bruitées ou non des capteurs et utilisent la géométrie à partir des positions et d'un modèle basé sur un rayon de couverture.

Toutefois, quelques approches utilisent un moyen détourné pour revenir à la méthode géométrique précédente en assumant une relation entre le rayon de communication et le rayon de couverture et en travaillant alors sur le réseau de communication pour inférer indirectement la couverture.

Décider si une zone est couverte ou non est nécessaire pour définir la stratégie de déploiement. En effet, si le déploiement n'est pas aléatoire ou si la densité locale des capteurs peut être choisie, alors il faut positionner les capteurs de façon optimale tout en assurant la couverture ou la k -couverture mais aussi la connectivité du réseau.

Il existe trois types de couverture dans les RCSF : une couverture qui sont la couverture de zone , la couverture de point et la couverture de barrière.

- **La couverture de barrière** : définie comme étant une multitude de couverture et dépendantes de la si tous les points d'intersection de la zone de couverture d'un nœud A et d'un nœud B sont compris dans une troisième zone de couverture, alors le nœud A peut se mettre en veille.
- **La couverture de point (cible)** : L'objectif principal dans ce type de problème est de couvrir un ensemble de points spécifiques, dont la position géographique est connue.
- **La couverture de zone** : S'appelle aussi la couverture de surface où l'objectif principal du réseau est de surveiller une région donnée , c.à.d. la zone d'intérêt représente comme une région tel que tout point de cette région est couvert par au moins un capteur.

La Figure 2.1 illustre les types de couverture dans RCSF selon notre classification.

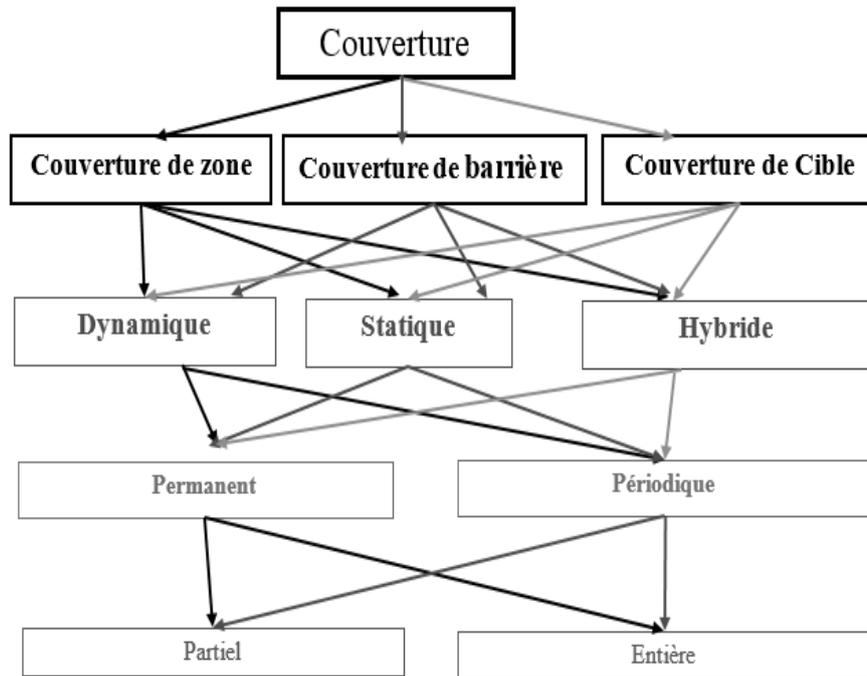


FIGURE 2.1 – Types de couverture.

2.5 Types de connectivité dans les RCSF

Il existe deux types de connectivité dans les RCSFs :[18, 19]

Une connectivité complète peut être soit simple (1-connectivité), soit multiple (k-connectivité). Une connectivité complète d'un RCSF est dite simple s'il existe un seul chemin entre chaque nœud source et la station de base, et l'autre multiple s'il existe plusieurs chemins distincts entre chaque nœud source et la station de base.

Selon les stratégies de placement des nœuds dans la zone de surveillance et selon les caractéristiques de l'application, une connectivité simple (ou multiple) peut être assurée lors de la 1er phase (déploiement des nœuds ou la redéploiement des nœuds).

Dans le cas de certaines applications des RCSF, il n'est pas nécessaire d'assurer et de maintenir en continu une connectivité complète du réseau, il est suffisant de garantir une connectivité intermittente en utilisant par exemple un ou plusieurs station de base mobile se déplaçant afin de recueillir ses informations par les nœuds capteurs déconnectés.

2.6 Relation entre la couverture et la connectivité

Comme nous l'avons vu précédemment que la connectivité est L'une des choses les plus importantes en termes de communication entre les nœuds , aussi la couverture sensorielle est la véritable raison d'être des réseaux de capteurs.

En effet, le déploiement d'un tel réseau est justifié par son application qui découle des mesures physiques faites sur le terrain (l'environnement de déploiement). C'est pourquoi le problème de la connectivité du réseau est souvent transformé en pratique en une contrainte à satisfaire pour l'optimisation de la couverture.

Donc La couverture sans connectivité est un handicap pour les RCSFs .

2.7 Classification des solutions de la couverture

Dans la littérature, il existe plusieurs classifications des protocoles de couverture, basées sur la connaissance de positions des capteurs, la coordination entre les nœuds capteurs ou bien le type du protocole utilisé.

Cette dernière inclut les protocoles centralisés et distribués. Dans les approches distribuées, chaque capteur collecte des informations de ses nœuds adjacents. Puis, il détermine son statut de manière autonome. Alors que dans les approches centralisées, une entité centrale appelée station de base recueille les informations des nœuds et décide de l'état de chacun d'entre eux. De plus, Suggère une autre classification ; protocoles coordonnés ou non coordonnés. Dans le premier type, les capteurs décident de leur état en se basant sur la collaboration avec leurs voisins. Tandis que, dans le deuxième type, chaque capteur agit indépendamment des autres sans qu'il n'y est de communication entre les nœuds.

En se basant sur la connaissance de positions géographiques des capteurs dans un réseau, les protocoles de couverture peuvent être classés en deux types ; basés sur les positions et indépendants des positions de nœuds capteurs. Toutefois, Wang et al. ont ajouté un troisième type basé sur la distance entre les capteurs. Dans le premier type, chaque nœud est supposé connaître son propre emplacement géographique. Dans le deuxième, la conception des protocoles ne nécessite pas la connaissance des positions. Enfin, dans le troisième seulement la distance séparant les nœuds du réseau est exigée.

On cite plusieurs solutions qui résolvent les problèmes de couverture dans WSN, ces dernières peuvent être classées en trois types[20] :

1. Solutions basées sur des approches protocolaires (Ordonnancement d'activité des capteurs,...).
2. Solutions basées sur des méthodes géométriques (Diagramme de Voronoï, Delaunay triangulation,...).
3. Solutions basées sur des méthodes analytiques (Programmation linéaire, Théorie de graphe, Heuristiques et Meta-heuristiques,...).

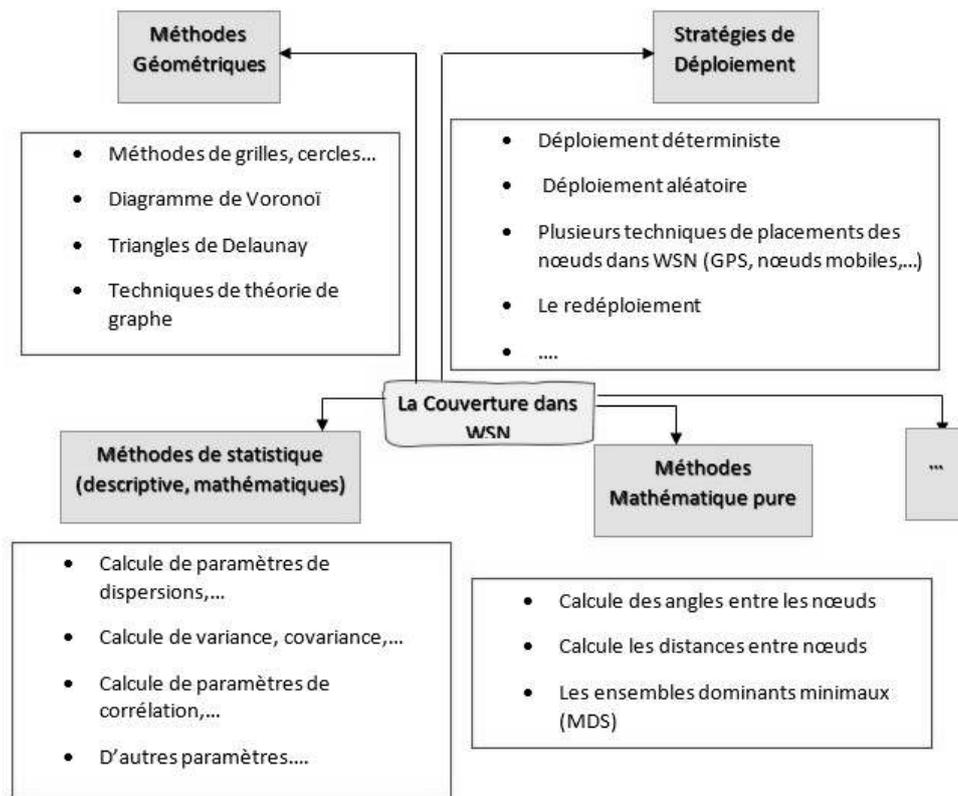


FIGURE 2.2 – Quelques domaines utilisés pour traiter le problème de couverture dans les RCSFs

2.7.1 Solutions basées sur des approches protocolaires

Ces sont généralement des protocoles basés sur l'ordonnancement d'activité dans RCSF[20, 21] ; tel que L'ordonnancement d'activité selon le critère de la couverture de surface qui consiste à organiser les activités des capteurs de façon à ce que l'ensemble des capteurs actifs (après l'élimination de la redondance) soit capable de couvrir une même zone que celle couverte par l'ensemble des capteurs du réseau.

La figure (2.3, a) montre un réseau de capteurs déployé sur une zone à surveillée. Cette surveillance ne requiert pas une activité permanente de la part de tous les nœuds comme illustré sur la figure (2.3, b) où seul un sous-ensemble des capteurs suffit à une observation exhaustive de la zone.

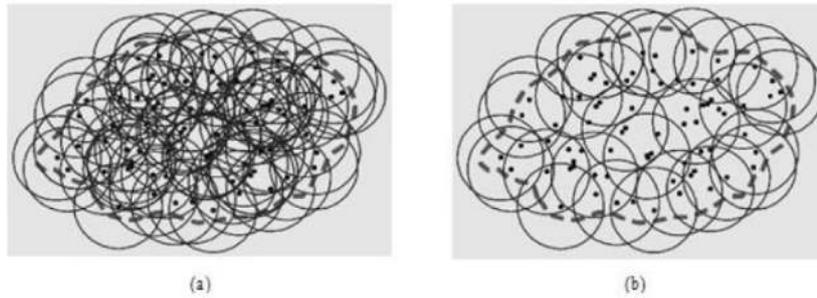


FIGURE 2.3 – Ordonnancement d'activités dans un réseau de capteurs [2]

(a) Tous les capteurs sont actifs.

(b) Seule une partie est nécessaire à couvrir

2.7.2 Solutions basées sur des méthodes géométriques

Dépendant des différents paramètres liés aux problèmes de couverture dans les réseaux capteurs sans fil qui sont traités dans le chapitre précédent. Dans la littérature, il existe plusieurs solutions basées sur des méthodes géométriques pour traiter le problème de couverture[22]. Elles sont basées sur des concepts et des calculs géométriques. Parmi ces méthodes on trouve :

- Solutions basées sur les techniques de déploiement (Déterministe, Aléatoire, Hybride).
- Solutions basées sur les techniques mathématiques de la géométrie (Diagramme de Voronoï, Triangulation de Delaunay, Cercles, Pavage, . . .)
- Solutions basées sur les méthodes analytiques (Probabilités, Statistiques Mathématique et Descriptive, Programmation linéaire, Théorie de graphe, Heuristiques et Meta-heuristiques, . . .)

Diagramme de Voronoï

Soit un ensemble des points (ou sites) dans un plan 2D [2] ; le diagramme de Voronoï est la partition de l'espace en de petites régions et s'appelle le polygone de Voronoï tel que chaque région contient un et un seul site (point), et tout point appartient a cette région "i" sont plus proche a site "i" que d'autre site.

On construit les lignes et les vertex de polygone de site "Si" par perpendiculaires des segments $[S_i, \text{voisins } S_i]$ et leurs intersections respectivement.

La figure suivante représente le diagramme de Voronoï pour l'ensemble des sites.

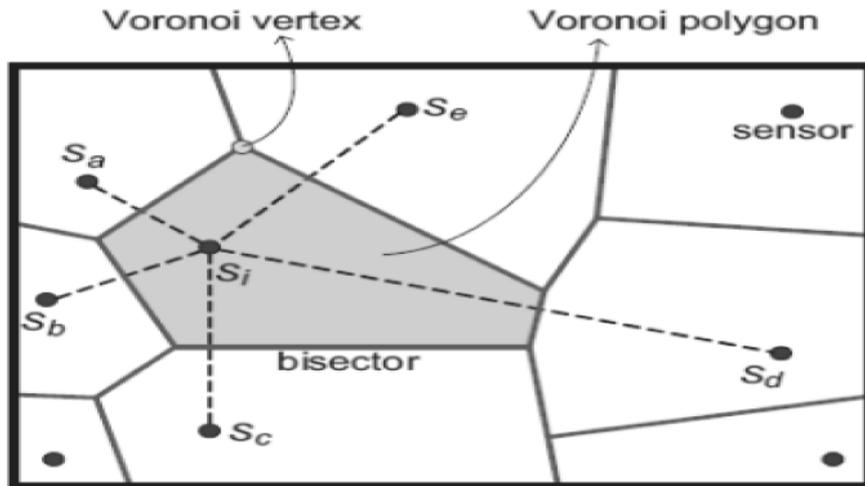


FIGURE 2.4 – Diagramme de Voronoi[2]

Triangulation de Delaunay

La Triangulation de Delaunay est formée par au moins trois sites ou points, sachant que le cercle autour de ces trois sites ne contient pas les autres sites (que ces 3 points). Le centre de ce cercle est le vertex de Voronoï, tel que la distance entre le centre de cercle et les trois sites sont égaux.[3]

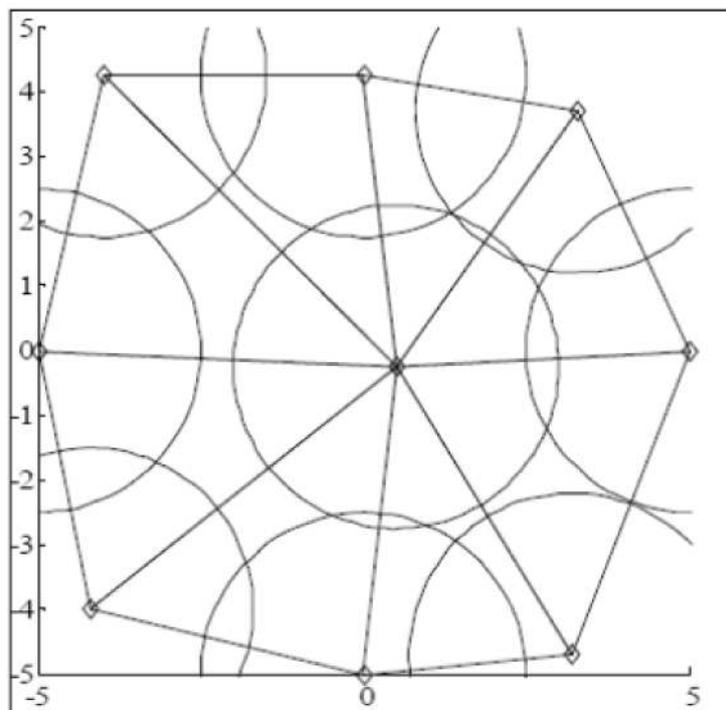


FIGURE 2.5 – Triangulation de Delaunay[3]

2.7.2.1 Solution centralisée basée sur le diagramme de Voronoï

la proposition d'un algorithme centralisé basé sur le diagramme de Voronoï permet de trouver des capteurs redondants, les déactivées parmi les capteurs déployés pour optimiser la couverture et maximiser la durée de vie du RCSF[23].

2.7.2.2 Le score de la Triangulation de Delaunay (DT-score)

C.-H. Wu et al[24] proposent une stratégie de déploiement des capteurs de manière déterministe. Cette stratégie basée sur la Triangulation de Delaunay pour maximiser la couverture de la zone d'intérêt avec l'existence d'obstacles, cet algorithme se compose en deux phases :

- La phase 1 : Contour based deployment : Elimination des vides de couverture qui sont près des frontières de la zone d'intérêt et les obstacles , cette phase réalisera en deux étapes la première c'est l'initialisation et la deuxième est la de génération des points contour
- La phase 2 : Refinement deployment : cette étapes est composée par deux étapes , une pour la détection de la position de candidature et l'autre étape pour l'évaluation (Scoring)

2.7.2.3 Déploiement incrémental

Dans le cas où il existe des trous de couverture dans la zone d'intérêt, un algorithme[23] basé sur une méthode géométrique est proposé pour résoudre ce problème . Cet algorithme détermine le nombre minimum de capteurs et leurs positions à redéployer pour incrémenter le taux de couverture et prolonger la durée de vie du réseau.

2.7.3 Solutions basées sur des méthodes analytiques

Ces solutions sont généralement basées sur les astuces mathématique et sur les applications de la recherche opérationnelle. par exemple la programmation linéaire en nombre entier, les heuristiques et Meta-heuristiques, etc.

2.7.3.1 Heuristique de "Most Constrained-Minimally Constraining"

Slijepcevic et Potkonjak[25] modélisent la zone d'intérêt comme un ensemble de domaines , et ces derniers définit comme un ensemble de points tel que deux points se trouvent dans le même domaine si et seulement, sont couverts par le même ensemble de capteurs.

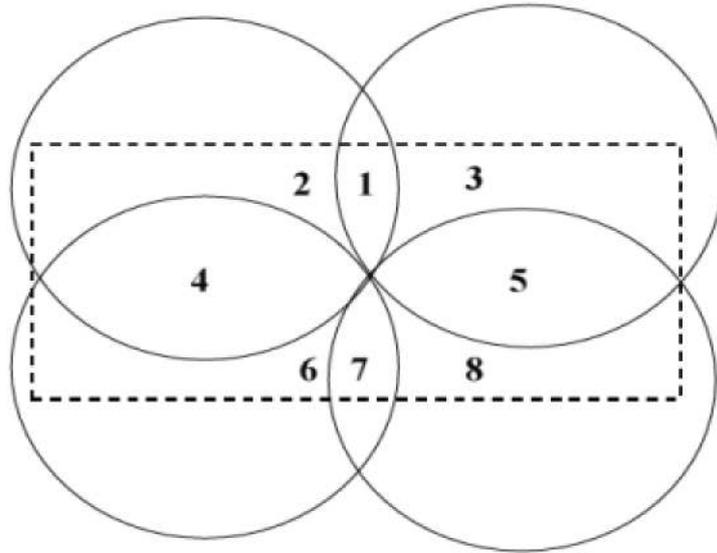


FIGURE 2.6 – Une surface divisée en huit domaines .[3]

2.7.3.2 Heuristique de ensembles dominants disjoints (Disjoint Dominating Sets)

Cardei et al dans [26] proposent une approche centralisée qui ordonne les nœuds dans des ensembles disjoints dominants par des nœuds qui assure la couverture complète de la zone à surveiller.

Le réseau de capteurs de n nœuds est considéré comme un graphe non orienté formé de n sommets. Une liaison entre deux sommets u et v existe si et seulement si u se trouve dans la zone de couverture de v et vice versa.

2.7.3.3 Programmation linéaire en nombre entier basée sur la grille (ILP based grid)

En modélisant le problème de couverture comme un problème d'un ensemble de couverture (cover set), par l'utilisation des outils mathématiques pour trouver une solution presque optimale.

Le modèle de couverture de grille est bien utilisé pour résoudre le problème de la couverture par ILP [27], Parce qu'il rendre un problème continue dans un domaine discret, pour l'objectif de trouver un nombre minimum de capteurs approximativement optimale pour couvrir tous les points de grille.

2.7.3.4 Programmation linéaire en nombre entier basée sur la méthode des points d'intersections

Les auteurs[27] modélisent le problème de couverture dans RCSF comme un problème de l'ensemble de couverture , Ils proposent un modèle mathématique basé sur la méthode des points d'intersections pour déterminer un nombre minimum des capteurs qui optimise la couverture dans RCSF.

2.8 Classification par stratégies de couverture

La qualité de la couverture est étroitement liée à la stratégie du déploiement des RCVSF , Ces derniers peuvent être déployés de deux manières différentes :

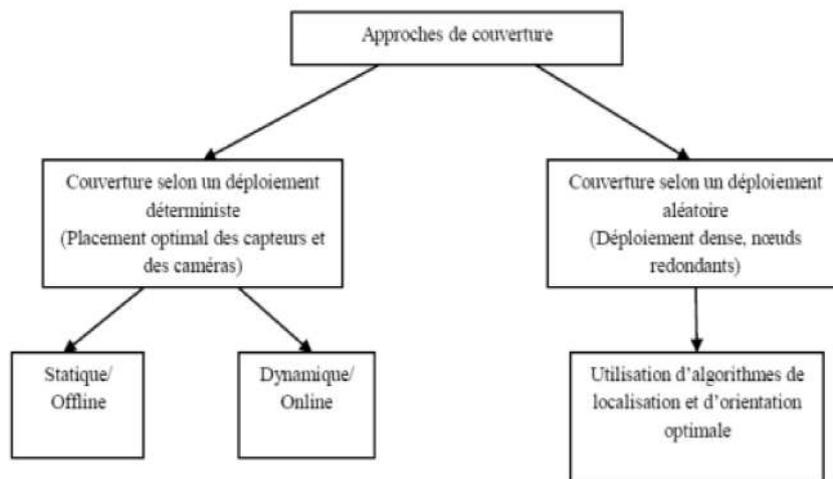


FIGURE 2.7 – Stratégies de couverture[4]

2.8.1 Couverture avec déploiement déterministe

Le déploiement déterministe peut être divisé en deux types. Dans le déploiement statique les capteurs déployés ne peuvent pas changer leur position après déploiement et un déploiement dynamiques si ces capteurs veut changer leur position [28].

Plusieurs travaux existants concernent la planification des positionnements des capteurs, la plupart d'entre eux explorent le domaine de la géométrie appliquée à l'informatique.

2.8.2 Couverture avec un déploiement aléatoire

Dans la majorité des applications des RCSF, les capteurs sont déployés de manière aléatoire à cause de type région dont l'infrastructure est limitée ou quasiment absente, telles que les zones dangereuses, hostiles ou difficilement accessibles, du moment que c'est plus simple et relativement moins cher pour les RCSF denses[29].

Pour compenser le manque de positionnement précis dans les déploiements aléatoires et pour fournir une tolérance aux pannes, les nœuds sont souvent déployés de manière très dense, avec plus de capteurs que nécessaire, par opposition à un placement optimal. Le réseau résultant sera composé de plusieurs nœuds redondants, utiles à la fois pour économiser de l'énergie et maintenir la couverture et la connectivité. La densité de déploiement peut également réduire le champ de communication, réduisant ainsi la consommation d'énergie.

2.9 Classification par algorithmes de couverture

2.9.1 Approches centralisées

Différentes approches centralisées sont développées et testées pour résoudre la problématique de déploiement des nœuds dans un RCSF comme : les algorithmes de Bernoulli (BDA), les approches basées sur la partition de Voronoi (VPA), les approches basées sur les forces virtuelles (VFA), les algorithmes de champ potentiel (PFDA), les algorithmes différenciés de déploiement (DDA), les approches d'optimisation évolutionnaires et d'intelligence collectives.

plusieurs travaux sont réalisés comme dans[30], un algorithme de déploiement pour les réseaux de capteurs mobiles qui est basé sur la force de van der Waals est proposé. En effet, une force de frottement est introduite dans l'équation de la force, la relation de contigüité des nœuds est définie par la triangulation de Delaunay, la force calculée produit une accélération pour les nœuds pour se déplacer. Une métrique d'évaluation appelée fonction de corrélation par paire est introduite pour évaluer l'uniformité de la distribution des nœuds, d'autres se sont intéressés aux réseaux auto-organisés avec intelligence collective en essaim (swarm intelligence) , d'autres proposent une méthodologie multi-objectif pour résoudre le problème de déploiement et d'affectation de l'énergie (Deployment and Power Assignment Problem)et plusieurs d'autres travaux .

2.9.2 Approches distribuées

En plus des approches centralisées, on trouve les approches distribuées qui exploitent les avantages de la distribution pour mieux résoudre la problématique de déploiement, trois algorithmes d'optimisation distribués sont également développés[31], sans l'utilisation d'un nœud central, pour replacer les nœuds et optimiser la couverture réseau. Chaque algorithme est coopérativement exécuté par tous les nœuds qui utilisent et communiquent entre eux des informations limitées pour se relocaliser et réaliser une meilleure couverture.

Deux de ces algorithmes utilisent les positions relatives entre les nœuds pour optimiser la couverture et la consommation d'énergie. Ils permettent une baisse de consommation d'énergie entre 20% et 25%.

Le troisième algorithme est le premier algorithme développé pour les réseaux dépourvus de la possibilité d'auto-localisation. Il soutient le déploiement optimal de tels réseaux sans exiger l'utilisation d'un matériel de géolocalisation ou l'optimisation de la consommation d'énergie pour les algorithmes de localisation. Selon eux, ceci est important pour les applications de surveillance à l'intérieur parce que les algorithmes de localisation actuels ne peuvent pas facilement fournir une bonne exactitude pour le redéploiement des capteurs dans des environnements intérieurs.

2.9.3 Approches hybrides

Les approches hybrides consiste à utiliser deux techniques ou plus pour résoudre la problématique voulue. Il reste à trouver le bon schéma d'hybridation et savoir combiner ces méthodes pour en tirer des avantages. Une stratégie proposée est appelée algorithme de déploiement multi-objectif (Multi-Objective Deployment Algorithm)[32]. Elle est basée sur un algorithme de forces virtuelles et de recherche tabou multi-objectif.

Parmi les métaheuristiques les plus récentes, on cite celle qui est basée sur la théorie de la biogéographie insulaire (BBO : Biogeography based optimization)[33].

Il y a aussi une nouvelles versions BBO hybrides pour résoudre les problèmes d'optimisation globale avec des variables continues avec et sans contraintes. Ces nouvelles versions BBO hybrides ont comme objectif l'empêchement de la lente convergence et le manque de diversité de l'algorithme BBO.

La première hybridation proposée est coupler le BBO avec l'algorithme d'évolution différentielle pour la résolution des problèmes d'optimisation sans contrainte, en particulier pour les problèmes multimodaux.

La seconde hybridation proposée consiste à utiliser trois nouvelles variantes de BBO pour résoudre les problèmes d'optimisation sous contraintes.

Un autre algorithme basé sur l'optimisation par essais particuliers (OEP) et sur le diagramme de Voronoi. L'OEP est utilisé pour déterminer le schéma de déploiement des capteurs assurant la couverture optimale alors que le diagramme de Voronoi est utilisé pour évaluer la fonction objective de la solution. Un algorithme nommé CSAPO (Clonal Selection Artificial Physics Optimisation Algorithm), Cet algorithme est la combinaison de deux algorithmes : l'algorithme d'optimisation physique artificielle (APO : Artificial Physics Optimisation Algorithm) et l'algorithme de sélection par clonage (CSA : Clonal Selection Algorithm). L'APO est utilisé pour mettre à jour l'objectif global alors que la CSA est utilisé pour permettre à l'algorithme précédent de s'échapper des optimaux locaux. [34], qui est la combinaison de deux algorithmes, l'algorithme d'optimisation physique artificielle (APO : Artificial Physics Optimisation Algorithm) et l'algorithme de sélection par clonage (CSA : Clonal Selection Algorithm). L'APO est utilisé pour mettre à jour l'objectif global alors que la CSA est utilisé pour permettre à l'algorithme précédent de s'échapper des optimaux locaux.

2.9.4 Algorithmes de placement

Le problème fondamental dans le processus de déploiement déterministe est comment déployer un RCSF qui assure les performances souhaitées. Le problème de déploiement des RCSF peut être formulé comme un problème des gardiens de musée où l'on s'intéresserait à la surveillance d'une salle de musée (Art Gallery Problem ou AGP) [35], dont les murs sont rectilignes, en y plaçant des gardiens assis sur des chaises fixées au sol, mais pivotantes. Le placement des capteurs sur une grille à deux et trois dimensions a été formulé comme un problème d'optimisation combinatoire [35]. Lorsqu'on considère des modèles binaires, il faut noter qu'il existe une relation entre la connectivité et la couverture.

Wang et al. et Zhang et al. En d'autres termes, avec cette condition, un RCSF doit être configuré pour garantir uniquement la couverture afin de satisfaire à la fois la couverture et la connectivité. Par conséquent, si le rayon de communication d'un capteur est beaucoup plus grand que son rayon de détection, la connectivité n'est pas un problème. Ce résultat a été généralisé

dans le cas de k -couverture. En résumé, la k -couverture implique aussi la k -connectivité lorsque la détection du capteur est modélisée de manière probabiliste ou évidentielle, le problème de déploiement des RCSF est formulé comme un problème d'optimisation qui est np-complet.

2.10 Conclusion

Généralement, l'objectif de la couverture est de trouver un nombre minimal des nœuds connectés pour assurer la couverture de la zone d'intérêt, afin de prolonger la durée de vie du WSN et d'optimiser la consommation de l'énergie de chaque nœud. Le prochain chapitre sera consacré à présenter quelques théories de l'incertain, notamment celles qui sont utiles pour notre cas d'étude (la théorie de possibilité et la croyance). Nous terminons ce chapitre par une conclusion qui résume la nécessité d'utiliser les théories de l'incertain dans le traitement des problèmes des réseaux de capteurs sans fil, notamment le problème de la couverture.

Plusieurs travaux se sont intéressés à développer des solutions pour assurer la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans ce chapitre, nous avons classé ces travaux en trois axes ((a) stratégies de couverture, (b) algorithmes de couverture et (c) domaines impliqués dans la solution). Pour chaque axe de classification, nous avons cité quelques solutions proposées dans la littérature. Dans la classification par domaine, nous avons cité cinq types d'approches selon les techniques utilisées. Les approches géométriques, les approches de déploiement, les approches analytiques, les approches de sondages et les approches de clustering. Nous avons présenté et illustré certaines solutions pour chaque approche. Généralement, l'objectif de ces solutions est de trouver un nombre minimal des nœuds connectés pour assurer la couverture de la zone d'intérêt, afin de prolonger la durée de vie du WSN et d'optimiser la consommation de l'énergie de chaque nœud.

Chapitre 3

Conception & Réalisation

3.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil ont été largement utilisés pour les nœuds de capteurs capables de détection, calcul et de communication coopératifs.

Une fois que les nœuds de capteurs fixes sont déployés dans une zone d'intérêt, ils ne peuvent pas être facilement réorganisés. Pour obtenir une couverture complète avec un RCSF fixe, il doit y avoir des nœuds de capteurs redondants, en fonction de la taille de la région d'intérêt et de la plage de détection de chaque capteur.

De plus, ils doivent être déployés pour s'assurer qu'il n'y a pas de lacunes dans la couverture.

Malheureusement, les RCSFs sont souvent utilisés dans des applications où le déploiement manuel des capteurs peut être difficile, et la taille du réseau diminue avec le temps en raison de la défaillance du nœud du capteur et de l'épuisement de la batterie.

Les réseaux de capteurs mobiles RCSFs surmontent les lacunes de leurs homologues fixes en utilisant des nœuds de capteurs mobiles qui peuvent être déplacés et réorganisés au sein du réseau pour faire face aux changements rapides de topologie. Un RCSF peut commencer par une distribution initiale arbitraire, puis diffuser vers des régions d'intérêt pour recueillir des informations.

3.2 Principe générale de fonctionnement du (AADDC-RCM)

Li et al. ont proposé deux algorithmes d'auto-déploiement de réseau de capteurs mobiles pour construire une couverture de zone autour d'un point d'intérêt donné [36]. Les algorithmes proposés dans [36] donnent une priorité de couverture plus élevée aux zones proches du point d'intérêt par rapport aux zones éloignées. Certaines premières tentatives pour obtenir une couverture uniforme des RCSFs se sont concentrées sur le déploiement de nœuds de capteurs aux emplacements souhaités en utilisant des champs de potentiel artificiels ou des champs de force virtuels [37].

Derr et Manic ont proposé deux algorithmes pour déterminer une meilleure configuration pour les RCSFs. Leur premier algorithme est basé sur une approche centralisée qui est capable de générer des configurations de réseau maillé pour atteindre une couverture de zone de 100 %. Dans leur deuxième algorithme, une approche décentralisée a été proposée pour obtenir une couverture adaptative dans les réseaux maillés en ajustant dynamiquement la plage de détection des nœuds de capteurs.

Mahboubi et al. [36] ont proposé plusieurs algorithmes basés sur les diagrammes de Voronoï pour améliorer le capteur couverture du réseau l'algorithme proposé en [38] utilise des diagrammes de Voronoï à pondération multiplicative pour détecter les trous de couverture. Une fois détectés, les capteurs mobiles sont déplacés directions appropriées pour minimiser la taille de la couverture des trous. Des stratégies de mouvement basées sur les bords et les sommets ont été proposées afin d'orienter les nœuds de capteurs vers les trous de couverture. Cheng et Savkin ont proposé un algorithme de contrôle décentralisé pour les RCSFs afin d'obtenir une couverture de couverture optimale entre deux limites arbitraires [39]. Le réseau de capteurs généré garantit un nombre minimum de capteurs requis pour obtenir une couverture complète.

Cet algorithme se base sur l'hybridation de trois algorithmes :

1. Algorithmes de contrôle de mouvement entièrement coordonnés :

Les algorithmes de contrôle des mouvements entièrement coordonnés peuvent être classés en deux types [40] . Le premier type d'algorithmes de contrôle coordonné des mouvements divise une zone d'impact en un certain nombre de sections en fonction du nombre de nœuds de capteurs mobiles dans le réseau de telle sorte que le chevauchement entre ces sections est minimisé. Chaque capteur est responsable de la couverture d'une section particulière. Une solution basée sur un diagramme de Voronoi est proposée dans [41].

Le deuxième type d'algorithmes forme une équipe de nœuds de capteurs mobiles qui effectuent des recherches coordonnées sur une zone d'intervention [42]. Un algorithme coordonné de surveillance par capteurs a été proposé en pour identifier les intrus qui tentent d'entrer dans une zone d'impact.

Ces algorithmes reposent sur des attributions de tâches adéquates et des exécutions précises des tâches attribuées par les nœuds de capteurs. Une répartition appropriée des tâches ne peut être efficace que dans des environnements statiques parfaitement connus. Néanmoins, l'exécution précise des tâches dépend fortement de la localisation et de la navigation la précision des nœuds de capteurs qui sont souvent erronés en raison du bruit et des défauts matériels. En général, les RCSFs à mouvement contrôlé entièrement coordonnés sont moins robustes pour les défaillances des nœuds, car de telles défaillances entraîneront des trous de couverture. De plus, ces systèmes sont moins évolutifs, car ils doivent

être reconfigurés lorsque le nombre de nœuds de capteurs varie.

2. Algorithmes de contrôle de mouvement entièrement aléatoires :

les algorithmes de contrôle des mouvements entièrement aléatoires permettent aux nœuds de capteurs mobiles de se déplacer dans des directions aléatoires sous une vitesse maximale [43],[44].

La couverture de surface cumulée sur une période de temps dépend de la vitesse de mouvement et la portée de détection des nœuds du capteur. Des vitesses plus élevées des nœuds peuvent conduire à une couverture de surface accumulée plus élevée, mais de nombreux endroits seront laissés à découvert si la fréquence de détection est trop faible.

Lie et al. ont proposé un modèle de contrôle des mouvements aléatoires pour la couverture dynamique des RCSFs, qui permet aux nœuds de capteurs de se déplacer en lignes droites dans des directions aléatoires jusqu'à ce qu'ils atteignent la limite de la zone d'intervention [45]. Ils ont montré que leur système proposé peut atteindre une couverture complète de la zone à mesure que le temps passe à l'infini. Les RCSFs à mouvement aléatoire prennent plus de temps à couvrir une zone donnée que les RCSFs à mouvement coordonné fonctionnant à la même vitesse, principalement en raison d'un chevauchement considérable de la couverture de détection. D'autre part, ils sont plus robustes aux défaillances de nœuds et présentent une meilleure adaptabilité et évolutivité par rapport aux RCSFs entièrement contrôlés par mouvement.

3. Algorithmes de contrôle de mouvement émergent :

Les algorithmes de contrôle de mouvement émergent permettent aux nœuds de capteurs mobiles de se auto-organiser au sein du réseau en utilisant des interactions locales. Ces systèmes auto-organisés sont souvent basés sur des règles simples pour atteindre leurs objectifs sans des informations complètes sur l'environnement. De nombreux exemples de systèmes auto-organisés se trouvent dans la nature, tels que les essaims de bactéries, les troupeaux d'oiseaux et les bancs de poissons.

Reynold a décrit le comportement collectif de ces groupes d'animaux en utilisant trois règles heuristiques : le centrage du troupeau, l'évitement des collisions et l'appariement des vitesses. Inspirées par les comportements collectifs des animaux, de nombreuses recherches ont développé des algorithmes de contrôle de floccage qui ont permis des comportements auto-organisés pour les systèmes multi-agents [46],[47]. Dans les RCSFs, les algorithmes de contrôle de floccage sont couramment utilisés pour di-

riger un groupe de nœuds de capteurs afin de suivre une cible dynamique.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe générale de fonctionnement du (AADDCC-RCM) qu'est basée sur les trois algorithmes : algorithmes de contrôle de mouvement entièrement coordonnés, algorithmes de contrôle de mouvement entièrement aléatoires et algorithmes de contrôle de mouvement émergeant.

Chapitre 4

Simulation

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous réaliserons une simulation du protocole Anti-floc Distribués pour la Couverture Dynamique pour réseau de capteur mobile (AADDC-RCM) sur MATLAB, le but de cette partie est de donner de manière générale la présentation théorique de protocole décrite précédemment.

4.2 Simulation et analyse de performances

Dans la littérature, nous distinguons plusieurs modèles de simulation selon qu'ils soient déterministes ou aléatoires, continus ou discrets. Cette décision a été prise après l'étude des simulateurs de RCSFs existants (NS-2, TOSSIM, OPNET), qui étaient pour la plupart beaucoup trop lourds, difficile à maîtriser dans des délais aussi courts. **Aperçu sur les simulateurs des réseaux de capteurs** Ils existent plusieurs simulateurs dédiés pour les réseaux de capteurs :

- OPNET (Optimum Network Performance) : comme NS, OPNET est un simulateur à événements discrets. C'est un outil très puissant pour la simulation et l'évaluation de performances des réseaux. Il permet aussi à l'utilisateur de construire ses propres modèles des plus simples aux plus complexes [48] ;
- NS-2/NAM (Network Simulator 2) : c'est un simulateur développé à Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Le langage de base de NS est le C++. L'outil NAM (Network Animator), associé au simulateur NS, permet de visualiser des animations de la simulation (transfert des paquets d'un à un autre, taille des paquets, etc.) ;
- TOSSIM : est le simulateur de TinyOS créé par l'université de Berkeley. Il permet de simuler le comportement d'un capteur (envoi/réception de messages via les ondes radios, traitement de l'information, etc.) au sein d'un réseau de capteurs. Pour une compréhension moins complexe de l'activité d'un réseau, TOSSIM peut être utilisé avec une interface graphique, TinyViz, permettant de visualiser de manière intuitive le comportement de chaque capteur au sein du réseau.

Choix de MATLAB : MATLAB est un logiciel de calcul numérique produit par MathWorks. Il est disponible sur plusieurs plateformes. MATLAB est un langage simple et très efficace, optimisé pour le traitement des matrices, d'où son nom. Pour le calcul numérique, MATLAB est beaucoup plus concis que les vieux langages (C, Pascal, Fortran, Basic) et pour la programmation, il optimise le code des programmes en utilisant des fonctions prédéfinies. Nous

pouvons traiter la matrice comme une simple variable. MATLAB contient une interface graphique puissante, et on peut l'enrichir en ajoutant des boîtes à outils *z* (toolbox) qui sont des ensembles de fonctions supplémentaires, profilées pour des applications particulières (traitement de signaux, analyses statistiques, optimisation, etc.)

MATLAB contient également un langage de programmation de haut niveau dans lequel nous retrouvons la majorité des concepts des langages de programmation modernes (types Pascal et C.). L'ordre d'exécution des instructions est déterminé par des structures de contrôle.

Il permet aussi la création de fonctions et distingue les données locales des données globales. Ces avantages ont rendus de MATLAB, un langage de programmation et de simulation très sollicité [49]. Pour ce faire, et pour expérimenter la solution proposée, nous avons Choisi d'utiliser un outil de simulation qui est MATLAB.

4.3 Étapes de fonctionnement du protocole AADD-RCM

Le protocole simulé est l'hybridation de trois algorithmes comme montrée la FIGURE 4.1

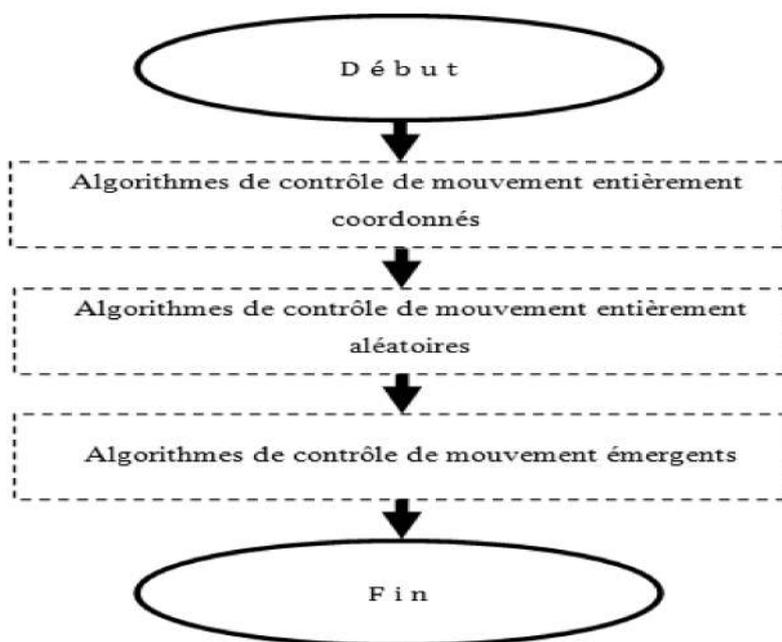


FIGURE 4.1 – Principe générale de fonctionnement du AADD-RCM

Le système de simulation choisi est représenté par une zone de capture d'une surface de $X \times X$ ($X=5, 10, 15, 20$ ou 50) m^2 comportant n

capteurs ($n = 2, 4, 6, 8$ ou 10) et une station de base. De ce fait, les entités de notre système, sont :

- **Station de base** : elle est responsable de l'envoi des requêtes et de la collecte des données du réseau.
- **nœuds capteurs** : ils servent à détecter les événements et participent au routage des informations dans le réseau.

Le modèle réseau utilisé consiste en un ensemble de capteurs mobiles, aléatoirement dispersés sur le terrain simulé (zone d'intérêt), présentant des caractéristiques identiques en mémoire et en puissance de traitement, et dont l'énergie initiale de chacun d'entre eux est fixée à 0.1 joule.

Le tableau suivant regroupe les paramètres caractérisant le déploiement des nœuds exploités à notre simulation

Paramètre	Valeur
Surface de déploiement	50x50m
Nombre total de noeuds	2,4,8,10
Energie	0.1 Joule
Rayon de communication	50
Rayon de détection	5
Protocole	AADDC-RCM

TABLE 4.1 – Les paramètres utilisés dans la simulation

4.4 Analyse de résultats

Dans ce qui suit, nous allons présenter et analyser les résultats de simulations obtenus . Pour les simulations réalisées, les résultats obtenus sont représentés par le graphe suivant qui présente le temps final par rapport au nombre des nœuds de capteurs et la surface de la zone de capture :

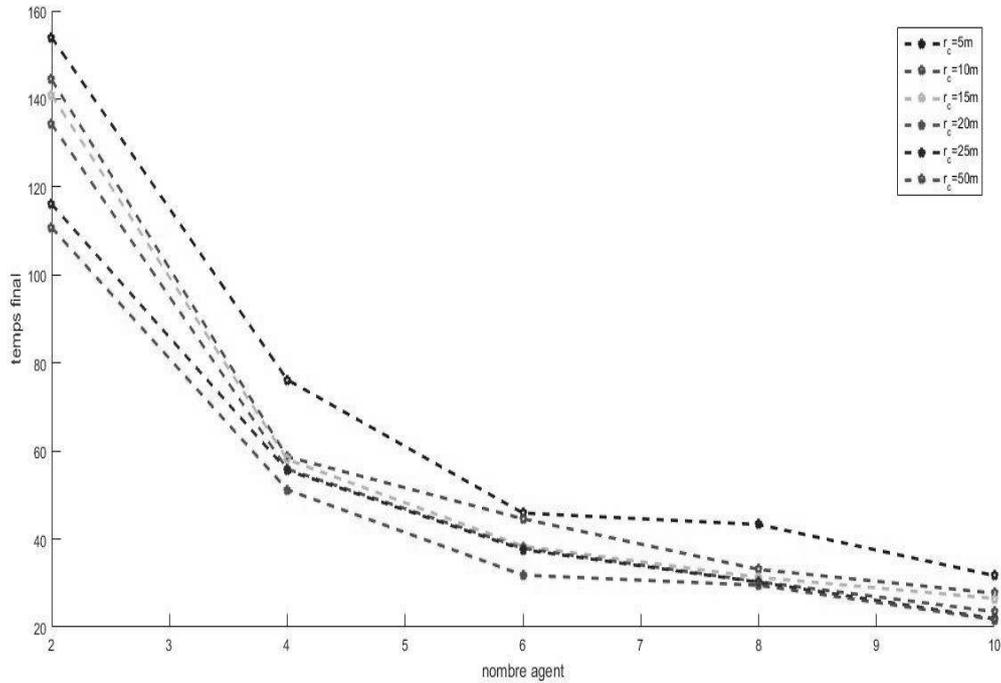


FIGURE 4.2 – Le temps final en fonction de nombres des nœuds de capteur.

L'application de simulation , au début commencer par une interface graphique comme montré la FIGURE 4.3 :

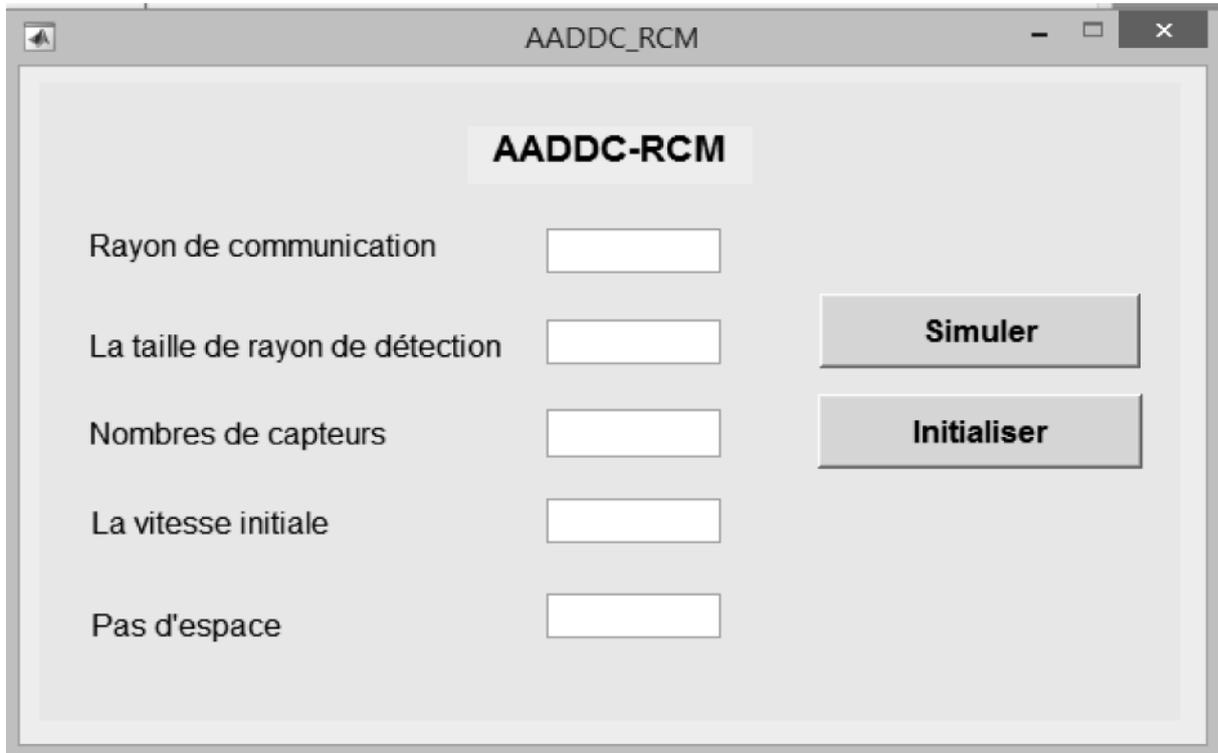


FIGURE 4.3 – L'interface principale

Les figures (FIGURE 4.4, FIGURE 4.5, FIGURE 4.6, FIGURE 4.7 et FIGURE 4.8) présentent les résultats de simulations après la déploiement de nombre de capteurs (2, 4, 6, 8 et 10) dans une zone de couverture de 50×50 .

On conclut que le temps final après l'exécution selon les paramètres décrites est décrétement en fonction de nombre des nœuds de capteurs et la surface de la zone d'intérêt pour les réseaux suivants :

- La zone est couverte dans un délais très courte après le déploiement et l'activation de plusieurs nœuds de capteurs mobiles.
- Quand la surface de la zone de capture augmente, les nœuds de capteurs possède une plus grande liberté de dispersion dans la zone d'intérêt.

Emplacements de 2 nœuds de capteur sur une surface $r_c = 50\text{m}$ à $t = 25.6\text{s}$

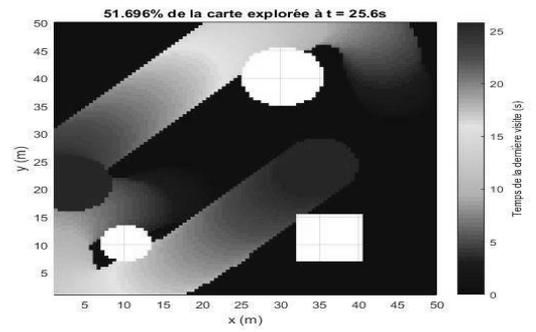
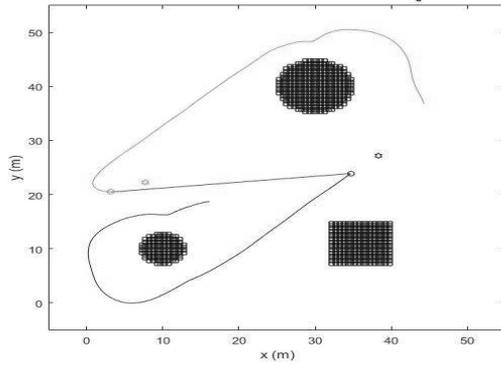


FIGURE 4.4 – Emplacements des 2 nœuds de capteur sur une surface de $50 \times 50\text{m}^2$.

Emplacements de 4 nœuds de capteur sur une surface $r_c = 50\text{m}$ à $t = 7.7\text{s}$

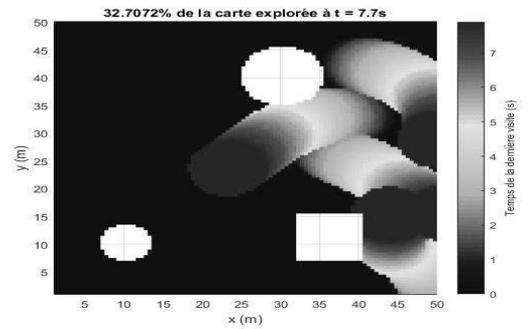
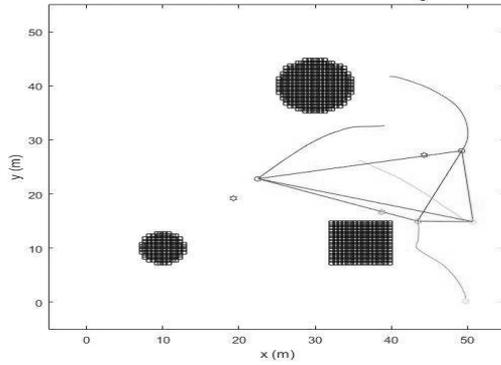


FIGURE 4.5 – Emplacements des 4 nœuds de capteur sur une surface de $50 \times 50\text{m}^2$.

Emplacements de 6 nœuds de capteur sur une surface $r_c = 50\text{m}$ à $t = 18.3\text{s}$

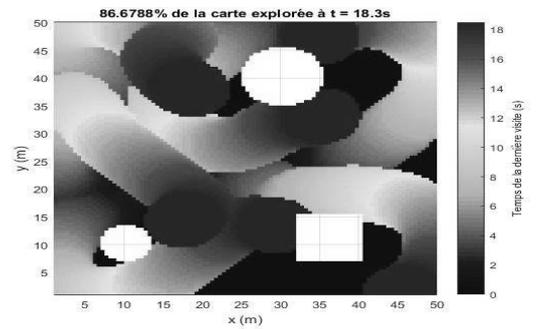
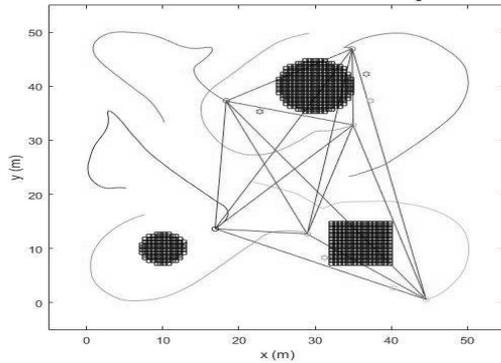


FIGURE 4.6 – Emplacements des 6 nœuds de capteur sur une surface de $50 \times 50\text{m}^2$.

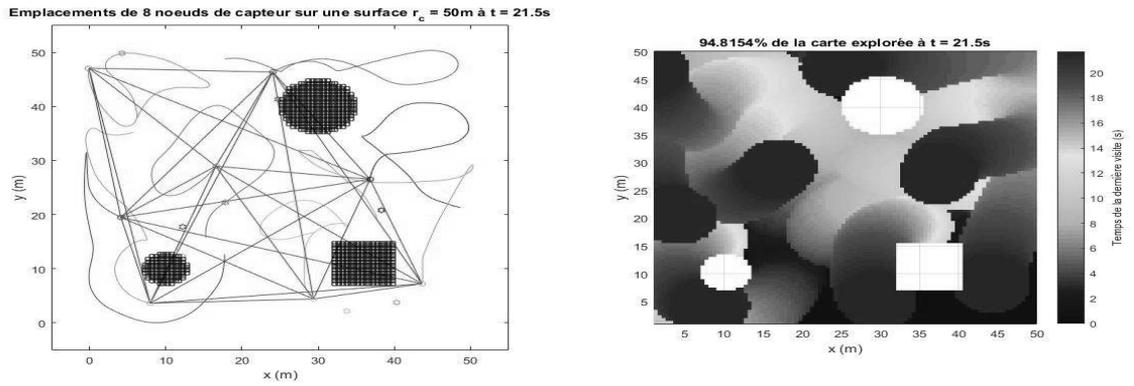


FIGURE 4.7 – Emplacements des 8 nœuds de capteur sur une surface de $50 \times 50m^2$.

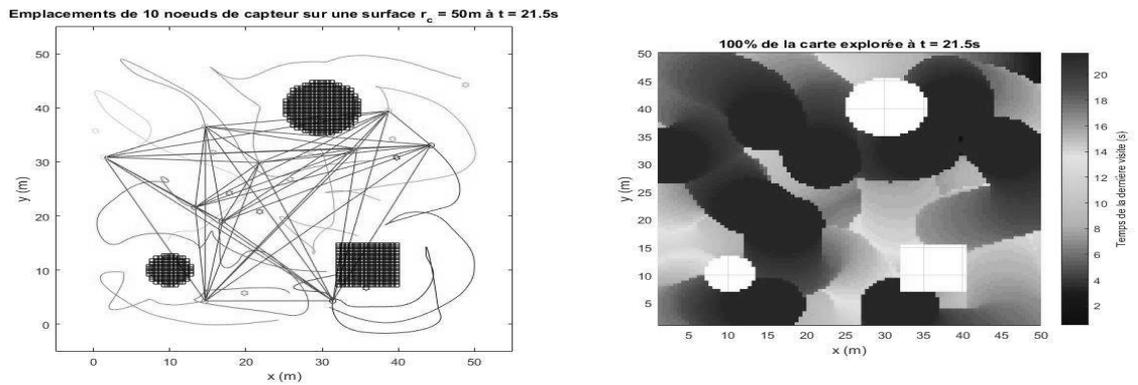


FIGURE 4.8 – Emplacements des 10 nœuds de capteur sur une surface de $50 \times 50m^2$.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la stratégie de simulation du protocole de couverture AADDC-RCM, simulé sur MATLAB, ainsi que les résultats obtenus après l'implémentation. Le AADDC-RCM a été évalué en fonction de nombre de nœuds mobile déployés aléatoirement et avec la taille de la zone d'intérêt. Les résultats obtenue montrent que AADDC-RCM est très efficace en terme de couverture dans un délais très court, Ce qui influence la connectivité et la consommation énergétique.

Conclusions et Perspectives

Dans ce mémoire, nous avons présenté et traité d'une manière plus précise et selon notre classification le problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, qui à son tour participe à résoudre les problèmes de la connectivité et l'augmentation de la durée de vie du réseau de capteurs sans fil. Lorsque les nœuds de capteurs sont déployés, ils constituent un réseau de capteurs dans une zone d'intérêt inaccessible par l'être humain, ou encore, ils peuvent être déployés sur les vastes zones, c'est-à-dire lorsqu'il est difficile voire impossible de remplacer les batteries des nœuds de capteurs épuisés alors la consommation d'énergie devient un problème fondamental. Du coup, la recherche des solutions pour surmonter ce dernier problème est une nécessité. Ce défi a encouragé les chercheurs à développer des stratégies plus efficaces en termes de gestion de connectivité et de la consommation d'énergie, . . . , alors la couverture est l'une des solutions constatées pour le réseau de capteurs sans fil (RCSF).

Ce mémoire a traité le problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil avec un modèle hybride de 3 protocoles participant dans la couverture. Ce protocole a fourni, d'une part pour assurer et améliorer la couverture de réseaux de capteurs, et d'autre part pour réduire la consommation d'énergie pour but augmenter la durée de vie du réseau de capteurs.

Bibliographie

- [1] D. M. R. SENOUCI, “Le deploiement des reseaux de capteurs sans fil,” in *CERISTNEWS*, CERIST, dec 2014, p. 15.
- [2] K. Abdelkader, “Méthodes analytiques pour la couverture dans un réseau de capteurs sans fil,” thesis, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2010.
- [3] M. Berg, O. Cheong, M. Kreveld, and M. Overmars, “Computalgorithms and applications,” *3rd edition*, Springer Press, 2008.
- [4] Y. E. Osais, M. St-Hilaire, and F. Riu, “Directional sensor placement with optimal sensing ranging, field of view and orientation,” in *Mobile Networks Applications*, Vol. 15, 2010, pp. 216–225.
- [5] M. GAYE, *État de l’art sur les wsn (wireless sensor network)*, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Juin 2014.
- [6] B. Kamel, “Conception d’un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs,” Thèse de Doctorat, Universite de Franche-Comte, 2009.
- [7] kouah riad, “Outage dans les reseaux de capteurs sans fil mobiles,” thesis, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, avril 2012.
- [8] TinyOS, “Tinyos. www.tinyos.net/tinyos-1.x/doc/,” 2003.
- [9] A. Boudjaadar, “Plateforme basée agents pour l’aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil,” Thèse de Magistère, Université de Skikda, 2009-2010.
- [10] A. BANANA, “Vers une plate-forme efficace en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil,” thesis, Université Ahmed Draia - Adrar Faculté des Sciences et de la Technologie Département des Mathématiques et Informatique, 2018.
- [11] M. BA, “Vers une structuration auto-stabilisante des réseaux ad hoc : cas des réseaux de capteurs sans fil,” Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 21 Mai 2014.

-
- [12] S. Naim, “Gestion de la mobilité dans les réseaux ad hoc par anticipation des métriques de routage,” Thèse de Doctorat, Université paris-sud, 22 juillet 2015.
- [13] D. Xenofon, I. Amundson, and Koutsoukos, “survey on localization for mobile wireless sensor networks,” in *A. MELT, LNCS, Springer, USA*, 2009.
- [14] F.-J. Y-C. Wang and Y-C. Tseng, “Mobility management algorithms and applications for mobile sensor networks,” *Wiley wireless communications and mobile computing*, 2009.
- [15] J. H. Y. Xu and D. Estrin, “Geography informed energy conservation for adhoc routing,” in *7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM’01)*, Rome, Italy, July 2001, pp. 70–84.
- [16] B. Karp and H. Kung, “Gpsr : Greedy perimeter state less routing for wireless networks,” *Mobile Computing and Networking*, pp. 243–254, 2000.
- [17] A. Panayiotou and T. P. Lambrou, “A survey on routing techniques supporting mobility in sensor networks,” in *Fifth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, Dept. of Electrical and Computer Engineering*, University of Cyprus, Nicosia, Cyprus, 2009.
- [18] B. Wang, “Coverage problems in sensor networks : A survey,” in *ACM Computing Surveys*, pp. 1–56, 2011.
- [19] D. Ngom, “Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau,” Thèse de Doctorat, l’Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), Jun 2017.
- [20] K. Abdelkader, “Méthodes analytiques pour la couverture dans un réseau de capteurs sans fil,” Mémoire de Magistère, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2010.
- [21] A. Gallais, “Ordonnancement d’activité dans les réseaux de capteurs : l’exemple de la couverture de surface,” Thèse de doctorat en sciences mathématiques (spécialité informatique), Université des sciences et technologies de Lille, France, juin 2007.
- [22] N. Aziz, K. Aziz, and W. Ismail, “Coverage strategies for wireless sensor networks,” *World Academy of Science, Engineering and Technology* 50, 2009.
- [23] M. A. M. Vieira, L. F. M. Vieira, L. B. R. Ruiz, A. O. A. A. F. Lureiro, and J. M. S. Nogueira, “Scheduling nodes in wireless sensor networks :

-
- A voronoi approach,” in *In 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, IEEE, 2003.
- [24] Y. C. Chun-HsienWu and K.-C. Lee, “A delaunay triangulation based method for wireless sensor network deployment,” *iee*, 2007.
- [25] S. Slijepcevic and M. Potkonjak, “Power efficient organization of wireless sensor networks,” in *IEEE International Conference on Communications*, 2001, pp. 472–476.
- [26] M. Cardei, D. MacCallum, and X. Cheng, “Wireless sensor networks with energy efficient organization,” *Journal of Interconnection Networks*, 2002.
- [27] A. Boukerche, X. Fei, and J. Feng, “Low information redundancy based node partition protocols for wireless sensor networks volume 5,” *Issue 8*, 2007.
- [28] M.Younis and M.Akkaya, “Strategies and techniques for node placement in wsn :a survey,” Thèse de Doctorat, univ.Oran, october 2015.
- [29] J.Ai and A. Abouzeid, “Coverage by directional sensors in randomly deployed wsa,” *Jouranl og combinatorial Optimization, Vol.11*, pp. 21–41, 2006.
- [30] W. H. X. Q. X. Yu, N. Liu and T. Zhang, “A node deployment algorithm based on van der waals force in wireless sensor networks,” *Hindawi Publishing Corporation ; International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013.
- [31] Y. Qu, “Wireless sensor network deployment,” thesis, Florida International University, Miami, Florida, USA, defense, march 2013.
- [32] N. A. Saadi, “Multi-objective wireless sensor network deployment,” thesis, PIERRE and MARIE CURIE UNIVERSITY, Ecole Doctorale Informatique, Télécommunication et Electronique (EDITE de Paris), March 2010.
- [33] I.BOUSSAÏD, “Perfectionnement de metaheuristiques pour l’otimisation continue,” thesis, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, June 2013.
- [34] L. Hui, Z. Xiaoguang, and L. Lijun, “A hybrid deployment algorithm based on clonal selection and artificial phphysics optimisation for wireless sensor networks,” *Information Technology Journal*, 2013.
- [35] J. O. Rourke, “Art gallery theorems and algorithms,” *Oxford University Press*, 1987.

-
- [36] X. Li, H. Frey, N. Santoro, and I. Stojmenovic, "Strictly localized sensor self-deployment for optimal focused coverage," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pp. 1520–153, 2011.
- [37] J. Chen, S. Li, , and Y. Sun, "Novel deployment schemes for mobile sensor networks," *Sensors*, pp. 2907–2919, 2007.
- [38] H. Mahboubi, J. Habibi, A. G. Aghdam, and K. Sayrafian-Pour, "Distributed deployment strategies for improved coverage in a network of mobile sensors with prioritized sensing field," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 451–461, 2013.
- [39] T. M. Cheng and A. V. Savkin, "Decentralized control of mobile sensor networks for asymptotically optimal blanket coverage between two boundaries," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 365–376, 2013.
- [40] Y.-Q. Miao, A. Khamis, and M. S. Kamel, "Applying anti-flocking model in mobile surveillance systems," *IEEE International Conference on Autonomous and Intelligent Systems (AIS)*, pp. 1–6, 2010.
- [41] Q. Wang and J. Huang, "A geometric method for improving coverage in sensor networks," in *in 2012 IEEE International Conference on Systems and Informatics (ICSAI).*, IEEE, 2012, pp. 1111–1115.
- [42] Y.-Q. Miao, A. Khamis, and M. Kamel, "Coordinated motion control of mobile sensors in surveillance systems," in *IEEE International Conference on Signals*, IEEE, may 2009, pp. 1–6.
- [43] B. Liu, P. Brass, O. Dousse, P. Nain, and D. Towsley, "Mobility improves coverage of sensor networks," in *in 2005 ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, ACM, 2005, pp. 300–308.
- [44] D. W. Gage, "Randomized search strategies with imperfect sensors," in *in Optical Tools for Manufacturing and Advanced Automation.*, 1994, pp. 270–279.
- [45] B. Liu, O. Dousse, P. Nain, and D. Towsley, "Dynamic coverage of mobile sensor networks," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, pp. 301–311, 2013.
- [46] R. Olfati-Saber, "Flocking for multi-agent dynamic systems : Algorithms and theory," *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 401–420, 2006.
- [47] N. Ganganath, C.-T. Cheng, C. K. Tse, and X. Wang, "Cluster-based informed agents selection for flocking with a virtual leader," in *IEEE*

International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), may 2015, pp. 2692–2695.

- [48] Y. Samira, “La couche mac avec contraintes d’énergie et d’équité dans les réseaux de capteurs,” thesis, Université Abderrahmane Mira de Béjaia, 2006.
- [49] A. MANUEL, “Atelier d’outils informatiques pour la physique (info-phys), éléments de matlab,” thesis, Département de la Physique de la Matière Condensée, université de Genève.