



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

Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté des Sciences Exactes

Département d'Informatique

Mémoire de Master Recherche
en Informatique

Option
Réseaux et Systèmes Distribués

Thème

**Proposition et implémentation d'une approche géométrique pour la
couverture dans les réseaux de capteurs sans fil**

Présenté par

M^r AMMAOUI Adel
M^r LAHLOU Laaziz

Dirigé par

Dr Rachid BEGHDAD MCA (HDR)

Devant le jury composé de :

M^r D. TOUAZI MAA
M^r M. SAADI MAA
M^{elle} M.SADOU (doctorante invitée)

2011/2012

Remerciements

Nous tenons en premier lieu à exprimer notre profonde gratitude et nos forts remerciements à notre encadreur D^r Rachid BEGHADAD qui nous à accompagné et conseillé tout au long de ce parcours. Un “Merci particulier” pour la qualité et le niveau du cours sur les réseaux mobiles dispensé.

Nous tenons à vous dire aussi qu’on est très reconnaissants envers vous pour cette “excellente initiation” à la recherche, notre envie d’aller plus loin et persévérer dans la recherche est puisée dans l’énergie et le dévouement que vous savez mettre quotidiennement dans cette tâche.

Nous adressons nos vifs remerciements au Professeur OUSSALAH de l’Université de Birmingham pour ces remarques pertinentes qui ont considérablement amélioré notre travail sans oublier le “Distinguished Professor” SS Iyengar de l’Université de Louisiane des Etats-Unis pour ces critiques et propositions notamment celle de l’adaptation des “structures complexes de Viectoris” afin de généraliser SPMC-WSN en 3D.

Nous profitons de cet espace également pour remercier Mr Omar, Mr Alloui et surtout Mr Moumen -pour sa “philosophie” et vision des choses-, qui ont marqué notre cursus universitaire.

Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté de juger notre modeste travail ainsi que l’invitée doctorante Sadou Malika.

Enfin mais pas à la fin ! à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l’aboutissement de ce modeste travail.

LAHLOU et AMMAOUI

Dédicaces

À ma grande mère dont les épreuves de sa vie m'ont donné la détermination nécessaire et le dévouement pour relever mes défis.

À mes parents, mes sœurs et mon frère.

À mes amis Tahar, Adel (mon binôme), Mokrane Mouloud, Nabila.

En la mémoire de mes grands parents Rachid, Belkacem et mon cousin.

À tous les enseignants du département d'informatique sans exceptions.

À Mme ZEROUATI ma prof d'analyse en 1 ère année pour sa sympathie et son sens de l'humour.

Laaziz LAHLOU

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents,

Mes frères et sœurs,

Ma femme,

Tous mes amis, collègues et enseignants de mon parcours d'étude.

Adel AMMAOUI

Table des matières

Table des matières	iv
Table des figures.....	v
Liste des tableaux	xi
Introduction Générale	1

CHAPITRE I

Présentation des RCSFs et problèmes de couverture et de connectivité

I.1. Introduction	3
I.2. Présentation des RCSFs.....	4
I.2.1. Définition d'un capteur.	4
I.2.2. Architecture d'un capteur	4
I.2.2.1. Architecture matérielle	4
I.2.2.2. Architecture logicielle.....	6
I.2.3. Différents types de capteurs	6
I.3. Architecture et communication dans un RCSFs.....	6
I.3.1. Architecture des RCSFs	6
I.3.2. Pile protocolaire de communication dans un RCSFs.....	8
I.4. Domaines d'applications des RCSFs	9
I.4.1. Applications Militaires.....	9
I.4.2. Applications environnementales	10
I.4.3. Applications Médicales.....	10
I.4.4. Applications commerciales.....	11
I.4.5. Habitat	11
I.5. Applications des RCSF	11
I.5.1. Applications orientées temps	11

I.5.2. Applications orientées événements	12
I.5.3. Applications orientées requêtes	12
I.5.4. Applications hybrides.....	12
I.6. Facteurs et contraintes des RCSFs	12
I.6.1. Durée de vie du réseau	12
I.6.2. Ressources limitées.....	12
I.6.3. Bande passante limitée	13
I.6.4. Facteur d'échelle	13
I.6.5. Tolérance aux pannes	13
I.6.6. Agrégation de données	13
I.6.7. Homogénéité et hétérogénéité du RCSFs	13
I.7. Les topologies des RCSFs.....	14
I.7.1. Le pré-déploiement	14
I.7.2. Le post-déploiement.....	15
I.7.3. Le re-déploiement	15
I.8. Problématiques dans les RCSFs	15
I.8.1. Routage.....	15
I.8.2. Sécurité	15
I.8.3. Couverture.....	15
I.8.4. Connectivité	15
I.8.5. Énergie	15
I.8.6. Diffusion de l'information	16
I.9. Problèmes de couverture.....	16
I.9.1. Problème de couverture dans les RCSFs	16
I.9.1.1. Modélisation d'un RCSF	17
I.9.1.2. Modèles de capture	18

I.9.1.3. Formulation du problème de couverture.....	19
I.9.1.3.1. Objectif visé.....	19
I.9.1.3.2. Nature des algorithmes.....	19
I.9.1.3.3. Méthodes de couverture	20
I.9.1.3.3.1. Méthodes géométriques	20
I.9.1.3.3.2. Méthodes des Grilles.....	21
I.9.1.3.4. Stratégies de couvertures	22
I.9.1.3.5. Types de couvertures.....	22
I.9.1.3.6. Type du déploiement	24
I.9.1.3.7. La couverture simple et multiple.....	24
I.9.1.3.8. Métriques d'évaluation de la couverture.....	25
I.9.1.3.9. Type du rayon de couverture	25
I.9.1.3.10. Relation entre la couverture et la connectivité	25
I.9.1.4. L'ordonnancement	26
I.9.1.5. La consommation énergétique.....	26
I.9.1.6. La connectivité	26
I.9.1.6.1. Type de connectivité	27
I.10. Conclusion	28

CHAPITRE II

État de l'art sur les méthodes de couvertures dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

II.1.Introduction.....	29
II.2.Stratégie de couverture.....	30
II.2.1.Couverture statique.....	30

II.2.1.1 Critiques et discussions	37
II.2.2.Couverture dynamique.....	38
II.2.2.1 Critiques et discussions	41
II.3.Tableau de synthèse des algorithmes de couvertures	42
II.4.Conclusion	45

CHAPITRE III

Proposition d'une approche pour la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

III.1. Introduction	46
III.2. Approche pour la couverture SPMC-WSN	47
III.2.1. Principe de SPMC-WSN	47
III.2.2. Hypothèses de travail.....	48
III.2.2.1. Déploiement des capteurs	48
III.2.2.2. Type du réseau	48
III.3. Description de SPMC-WSN.....	48
III.3.1. Problème de découpe	48
III.3.1.1. Formulation mathématique du problème de découpe	49
III.3.2. Modélisation de la couverture par le problème de découpe	50
III.3.2.1 Présentation de l'heuristique SHF	51
III.3.2.2. Description de l'heuristique SHF	56
III.3.3. Phase de placement dans SPMC-WSN	57
III.4. Problème des huit reines.....	59
III.4.1. Principe d'optimisation dans SPMC-WSN.....	66
III.4.2. Algorithme d'optimisation.....	70
III.4.3. Exemples d'applications	71

III.4.4. Généralisation de SPMC-WSN.....	72
III.4.4.1. Principe de généralisation de SPMC-WSN.....	73
III.4.4.2. Algorithme de généralisation SPMC-WSN	74
III.5. Comparaison entre QGMC et SPMC-WSN.....	75
III.6. Conclusion	76

CHAPITRE IV

Simulation et évaluation des performances de l'approche SPMC-WSN (Strip Packing Method for Coverage in Wireless Sensor Network)

IV.1. Introduction	76
IV.2. Environnement et paramètres de simulation.....	77
IV.2.1. Environnement de simulation.....	77
IV.2.2. Paramètres de simulation.....	77
IV.3. Évaluation de SPMC-WSN par rapport à [CWT04].....	77
IV.4. Conclusion.....	78
Conclusion Générale et perspectives	79
Références bibliographiques	80
Annexes	

Liste des figures

Chapitre I : Présentation des réseaux de capteurs sans fil et problèmes de couverture et connectivité

Figure I.1 : Anatomie d'un capteur	5
Figure I.2 : Exemple d'architecture d'un RCSFs	7
Figure I.3 : Pile protocolaire	8
Figure I.4 : Classification des domaines d'application des RCSFs	9
Figure I.5 : Application de surveillance et d'intervention militaire.....	10
Figure I.6 : Suivi des battements de cœur d'un patient	10
Figure I.7 : Suivi de la production d'un produit	11
Figure I.8 : Surveillance d'une bâtisse	11
Figure I.9 : Réseau hétérogène.....	14
Figure I.10 : Réseau homogène	14
Figure I.11 : Réseau de capteurs sans fils connecté	17
Figure I.12 : Zone de perception d'un capteur.....	18
Figure I.13 : Modèle de détection probabiliste.....	19
Figure I.14 : Diagramme de Voronoi.....	21
Figure I.15 : Triangulation de Delaunay	21
Figure I.16 : Déploiement aléatoire de capteurs sur une grille bidimensionnelle ..	22
Figure I.17 : Couverture de zone	23
Figure I.18 : Couverture de barrière.....	23
Figure I.19 : Couverture de points (cibles)	23
Figure I.20 : Largage aérien des nœuds capteurs dans un environnement hostile .	24
Figure I.21 : Différents niveaux de couverture	25
Figure I.22 : Ordonnancement d'activités des nœuds capteurs	26

Figure I.23 : Connectivité dans un RCSFs.....	27
---	----

Chapitre II : État de l'art sur les méthodes de couvertures dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

Figure II.24 : Placement des capteurs	31
Figure II.25: Déploiement et redéploiement des capteurs	32
Figure II.26 : Topologie statique d'une maille	33
Figure II.27 : Maille statique et virtuelle.....	33
Figure II.28 : Exemples de grilles complètement et partiellement couvertes	35
Figure II.29 : Exemples de grilles non uniformes	35
Figure II.30 : Placement des capteurs mobiles	39
Figure II.31 : mouvement des capteurs mobiles	39
Figure II.32 : Configuration des capteurs mobiles	40
Figure II.33 : Auto organisation autour d'un point d'articulation.....	41

Chapitre III : SPMC-WSN : une approche pour la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil

Figure III.34 : Représentation de la zone d'intérêt	49
Figure III.35 : Principe de l'algorithme BL.....	50
Figure III.36 : Illustration de la découpe guillotine	51
Figure III.37 : Algorithmes par couches.....	52
Figure III.38 : Liste de rectangles à placer	55
Figure III.39 : Bande de base vide.....	55
Figure III.40 : Avant le placement du rectangle 3	56
Figure III.41 : Après le placement du rectangle 3.....	56
Figure III.42 : Bande de base vide.....	57

Figure III.43 : Placement du premier capteur	57
Figure III.44 : Placement du second capteur	57
Figure III.45 : Bande de base après placement des capteurs.....	58
Figure III.46 : Placement des huit reines sur un échiquier.....	58
Figure III.47 : Relation entre le problème des huit reines et SPMC-WSN	59
Figure III.48 : Relation entre le rayon de capture et la dimension du rectangle conteneur de base.....	60
Figure III.49 : Couverture d'une bande de base de dimension $[2 \times 1]$	62
Figure III.50 : Couverture d'une bande de base de dimension $[1 \times 2]$	63
Figure III.51 : Couverture d'une bande de base de dimension $[2 \times 2]$	64
Figure III.52 : Principe de l'approche SPMC-WSN.....	65
Figure III.53 : Couverture d'une bande de base $[4 \times 4]$ par 4 capteurs.....	66
Figure III.54 : Couverture d'une bande de base $[6 \times 6]$ par 4 capteurs.....	67
Figure III.55 : Bande de base $[2 \times 3]$ diminuée de 3 rectangles	68
Figure III.56 : Bande de base $[3 \times 2]$ diminuée de 3 rectangles	68
Figure III.57 : Bande de base de dimension $[9 \times 9]$	70
Figure III.58 : Bande de base de dimension $[4 \times 9]$	71
Figure III.59 : Relation généralisée entre le rayon de capture et la grille de base...	72

Liste des tableaux

Chapitre I : Présentation des RCSFs et problème de couverture et de connectivité

Tableau I.1 : Différents types de capteurs6

Chapitre II : Etat de l'art sur les méthodes de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

Tableau II.2 : Tableau comparatif des approches étudiées..... 42

Chapitre III : Proposition d'une approche pour la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

Tableau III.2 : Comparaison entre QGMC [SS11] et SPMC-WSN..... 74

Résumé

Ces dernières années, les réseaux de capteurs sans fil ont pris un essor considérable grâce aux progrès récents dans le domaine de la microélectronique. Toutefois, l'un des problèmes majeurs ayant attiré l'attention des chercheurs est sans doute celui de la couverture dont l'objectif est de surveiller de façon continue une zone d'intérêt. Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature. Ces approches, le plus souvent font appel aux méthodes géométriques et celles à base de grilles.

Dans ce travail, nous proposons une approche pour la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, nommée SPMC-WSN (Strip Packing Method for Coverage in Wireless Sensor networks). La motivation principale était de modéliser le problème de couverture par celui de la découpe, un problème issu de la recherche opérationnelle. De plus, SPMC-WSN exploite la technique d'ordonnement d'activité à travers quelques règles issues du problème des huit reines, pour garantir une meilleure longévité du réseau et réduire la consommation énergétique.

Les résultats expérimentaux montrent que notre approche SPMC-WSN rivalise parfaitement avec certaines approches de la littérature. Ajouté à cela, le nombre de capteurs actifs diminue de façon considérable suivant les caractéristiques des capteurs en termes de rayon de couverture.

Mots clés: Réseaux de capteurs sans fil, Couverture, Ordonnement d'activité, méthode de découpe.

Abstract

In recent years, sensor networks Wireless has grown considerably thanks to recent advances in the field of microelectronics. However, one of the major problems that have attracted the attention of researchers is undoubtedly that of the coverage problem where the objective is to continuously monitor an area of interest. Several approaches have been proposed in the literature. These approaches, often make use of geometric methods and those based on grids.

In this work, we propose an approach for coverage in wireless sensor networks called SPMC-WSN (Strip Packing Method for Coverage in Wireless Sensor Networks). The main motivation was the modeling of the coverage problem as a strip packing problem; a well known problem in Operational Research cited in literature. Moreover, SPMC-WSN exploits the technique of scheduling activity through the eight queen's problem to ensure greater longevity of the network and reduce energy consumption.

Experimental results show that SPMC-WSN outperforms some approaches of the literature. Added to this, the number of active sensors decreases significantly following sensor characteristics in terms of coverage radius.

Key words: Wireless Sensor Networks, Coverage, Scheduling activity, Strip Packing Method.

Introduction Générale

Ces dernières années, les réseaux de capteurs sans fil sont devenus l'un des domaines de recherches ayant capté l'attention des chercheurs dû au futur intéressant et prometteur des technologies de l'information. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont généralement constitués d'un grand nombre de nœuds capteurs de faibles ressources (énergie, bande passante, *etc.*) déployés dans une zone géographique. Selon le domaine d'application (militaire, environnemental, médical, *etc.*), les capteurs peuvent être déployés de façon déterministe ou aléatoire.

Les capteurs ainsi déployés coopèrent à la réalisation de certaines tâches à savoir la collecte de données environnementales (température, taux de radioactivité), la surveillance d'objets (œuvres d'art d'un musée), *etc.*

Comme les capteurs sont alimentés par l'énergie de la batterie qui n'est pas remplaçable, il devient nécessaire de la conserver dans l'optique de préserver la durée de vie du réseau.

La couverture s'est révélée l'un des soucis principaux dans les réseaux de capteurs sans fil. Elle représente un paramètre fondamental d'évaluation de la qualité de service. Le problème de couverture est provoqué par trois principales causes: pas assez de capteurs pour couvrir toute la zone d'intérêt, déploiement aléatoire et limitation au niveau des capteurs i.e rayon de capture limité.

Dans ce mémoire, nous proposons une approche améliorée pour le problème de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, nommée **SPMC-WSN** (Strip Packing Method for Coverage in Wireless Sensor Networks). Notre approche modélise le problème de couverture comme étant un problème de découpe issu de la recherche opérationnelle, un problème très cité dans la littérature. Ajouté à cela, notre approche exploite aussi la technique d'ordonnancement d'activité pour garantir une meilleure longévité du réseau et réduire la consommation énergétique. Afin d'évaluer les performances de notre approche, nous avons développé un simulateur dédié en Java.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitre. Dans le chapitre I, nous présentons une introduction au domaine des réseaux de capteurs sans fil. Nous commençons d'abord par la définition des différentes notions et concepts orbitant autour de cette thématique, ensuite nous exposons la problématique de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil.

Le chapitre II est consacré à l'état de l'art relatif aux différentes solutions évoquées dans la littérature pour la résolution du problème de

couverture. Cet état de l'art est accompagné des différentes critiques relatives aux solutions étudiées. À la fin, un tableau comparatif est dressé suivant un certain nombre de critères que nous avons jugés les plus importants.

Le chapitre III constitue le cœur de notre travail. Dans ce chapitre, nous présentons de façon détaillée notre approche pour la couverture SPMC-WSN.

Le chapitre IV est consacré à la simulation et la validation de l'approche proposée. Les résultats de simulation, comparant notre approche avec d'autres méthodes évoquées dans le chapitre II, seront présentés.

À la fin, nous dégagant les perspectives de recherches relatives à notre approche en évoquant les hypothèses de travail qui doivent être reconsidérées et les pistes de recherches relatives à certaines approches étudiées.

Chapitre 1

Présentation des réseaux de capteurs sans fil et problèmes de couverture et connectivité

I.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, nous avons assisté à une miniaturisation du matériel informatique. Cette tendance à la miniaturisation a apporté une nouvelle génération de réseaux informatiques et télécoms présentant des défis importants.

Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des technologies visant à résoudre les problèmes de cette nouvelle ère de l'informatique embarquée et omniprésente.

La couverture et la connectivité font parties de ces problèmes. La première représente un paramètre fondamental d'évaluation de la qualité de service et la seconde est jugée indispensable afin qu'un RCSF soit capable de garantir la disponibilité du service.

Dans ce présent chapitre, nous présenterons en premier lieu les RCSFs en décrivant leurs architectures, les facteurs et contraintes de leurs conceptions en passant par leurs domaines d'applications. En second lieu, nous nous étalerons sur le problème de couverture.

Enfin, nous terminons ce chapitre par une conclusion.

I.2 Présentation des RCSFs

I.2.1 Définition d'un capteur

Un capteur ou nœud capteur (sensor node) qui revient fréquemment dans la littérature, est un dispositif de taille extrêmement réduite avec une ressource très limitée, autonome, capable de relever et traiter des informations et de les transmettre, via les ondes radio, à une autre entité (capteurs, unité de traitements...) sur une distance limitée à quelques mètres. [ASSC02, CES04]

Un capteur analyse son environnement, et propage les données récoltées aux capteurs appartenant à sa zone de communication. Chaque capteur relayant l'information sur sa propre zone de couverture, le réseau se trouve entièrement couvert. Plusieurs types de nœuds capteurs peuvent être distingués selon l'application :

- **Nœud ordinaire** : Il détecte les phénomènes physiques et surveille son environnement immédiat pour transmettre les données captées au nœud puits.
- **Nœud relais** : Son rôle est de relayer les informations reçues vers d'autres capteurs ou vers le nœud puits.
- **Nœud puits** : Son rôle est de collecter, stocker et analyser les données pour communiquer les résultats à d'autres réseaux auxquels il est connecté via Internet ou par Satellite.

I.2.2 Architecture d'un capteur

L'architecture d'un capteur comprend deux parties: une partie matérielle (ou physique) et une partie logicielle.

I.2.2.1 Architecture matérielle

L'architecture physique d'un capteur est constituée essentiellement de quatre éléments (Figure 1) : une unité de perception, une unité de traitement, une unité de communication et une unité de contrôle d'énergie [ASSC02].

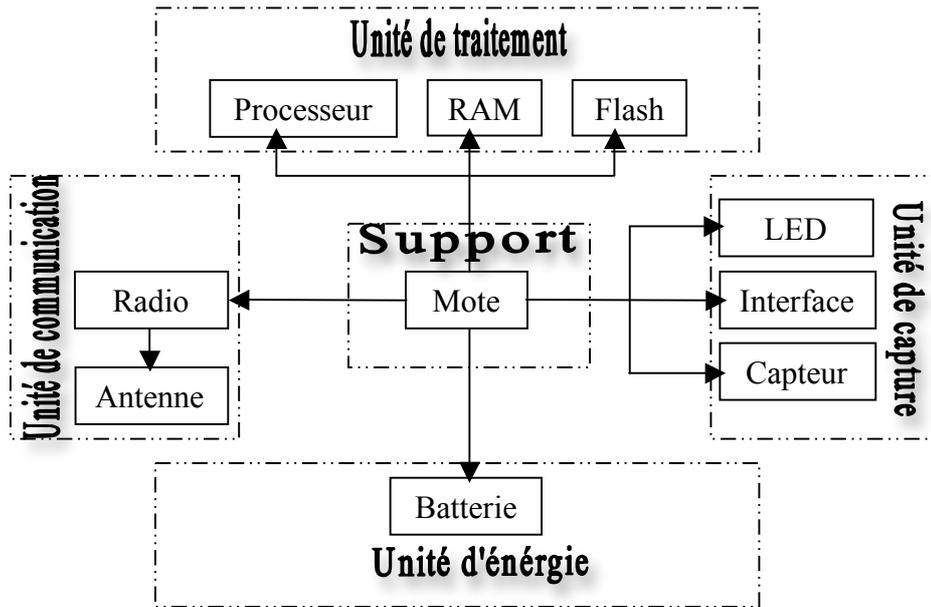


Figure I.1: Anatomie d'un capteur

- **Unité de capture** : Elle est composée de deux sous unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (Analog to Digital Converters).
- **Unité de traitement** : Elle se charge de communiquer les données captées au processeur où elles seront stockées dans la mémoire.
- **Unité de communication** : Elle est composée d'un émetteur-récepteur (module radio) permettant la communication entre les différents nœuds du réseau.
- **Unité d'énergie** : C'est la composante cruciale de tout nœud capteur qui n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable qui fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement du capteur. C'est l'entité qui représente la contrainte principale lors de la conception de protocoles pour les réseaux de capteurs. L'énergie consommée peut être reconstitué par un réapprovisionnement grâce à des photopiles qui permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique.

Récemment, des capteurs sans fils passifs (technologie SAW) [Kovacs98] sans batterie ont été développés par SENSEOR [Web1].

I.2.2.2 Architecture Logicielle

TinyOS est sans doute le système d'exploitation qui équipe le plus de dispositifs de faible consommation pour les réseaux de capteurs. Il est développé par l'Université de Berkeley. Le système, les bibliothèques et les applications de TinyOS sont écrits en nesC, qui est un nouveau langage de programmation adapté aux systèmes embarqués et en particulier aux réseaux de capteurs. D'autres systèmes d'exploitation existent comme LiteOS de l'Université d'Illinois.

I.2.3 Différents types de Capteurs

Suivant le domaine d'application auquel les capteurs sont destinés, plusieurs modèles sont commercialisés. Parmi les plus courants, on trouve ceux de Crossbow [Web3]. Il existe plusieurs fabricants de capteurs parmi lesquels on trouve : Art of Technology et Crossbow, Université de Twente, etc. Les différents capteurs sont : MICA2, EYES, Mica2dot, telosA, etc. Le tableau 1 ci-dessous illustre les différentes caractéristiques de ces capteurs.

Tableau 1. Différents types de capteurs

Type	Btnode 3	Mica2	Mica2dot	micaz	telosA	Tmote sky	EYES
Propriétés							
Constructeurs	Art of Technolgy	Crossbow			Imote iv		Université Twente
Microcontrôleur	Atmel Atmega 128L				Texas Instruments MSP 430		
Fréquence d'horloge	7,37 MHz		4MHz	7.37 MHz	8 MHz		5 MHz
RAM (KB)	64 + 180	4	4	4	2	10	2
ROM (KB)	128	128	128	128	60	48	60
Stockage (KB)	4	512	512	512	256	1024	4
Radio	Chipcon CC 1000 315/433/868/916 MHz 38.4 Kbauds			Chipcon CC2420 2.40 GHz 250 Kbps IEEE 802.15.4		RFM TR1001868 MHz 57.6 Kbps	
Rayon Max(m)	150-300			75-100			
Energie	Batteries 2AA		Cellule Coin	Batteries 2 AA			
Connecteur PC	Carte programmable				USB		Port Série
Système	Nut/OS	TinyOS					PEEROS
Divers	BlueTooth						

I.3 Architecture et communication dans un RCSF

I.3.1 Architecture des RCSFs

Les nœuds capteurs sont généralement dispersés dans une zone de capture. Chaque capteur a la capacité de collecter et de router les informations vers un autre nœud relais ou puits (station de base). Ce dernier est un point de collecte des données recueillies. Ce capteur peut communiquer les données recueillies à un utilisateur via un réseau de communication, éventuellement l'Internet.

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est souvent constitué de centaines voir des milliers de nœuds capteurs, une station de base et un

centre de traitement des données. Cette architecture est illustrée par la figure suivante. Il existe plusieurs topologies pour les réseaux de capteurs : topologie en étoile, topologie en maille (mesh network) et la topologie hybride.

a) Une zone de capture (zone d'intérêt)

Les capteurs seront déployés dans des zones où des phénomènes vont être observés. Cette zone sera par la suite le champ d'action du capteur et son activité en vue de collecter des informations.

b) Les nœuds capteurs

Ce sont les éléments de base de l'architecture. Ils ont pour objectifs de collecter les données afin de les envoyer à la station de base.

c) La station de base (puits)

Son rôle est de stocker et de traiter les données reçues des nœuds capteurs et de diffuser les différentes requêtes au réseau. L'une des principales caractéristiques qu'elle possède est la source d'énergie illimitée puisqu'elle doit recevoir les données des nœuds du réseau. La station de base peut être de nature différente à savoir ; un ordinateur, un PDA, téléphone, etc.

d) Centre de traitement des données

Le rôle du centre de traitement des données est de regrouper et traiter les données préalablement recueillies par la station de base afin d'en extraire les informations pertinentes en vue d'une exploitation bien déterminée par exemple : informations sur les changements climatiques (température, pression atmosphérique, etc.).

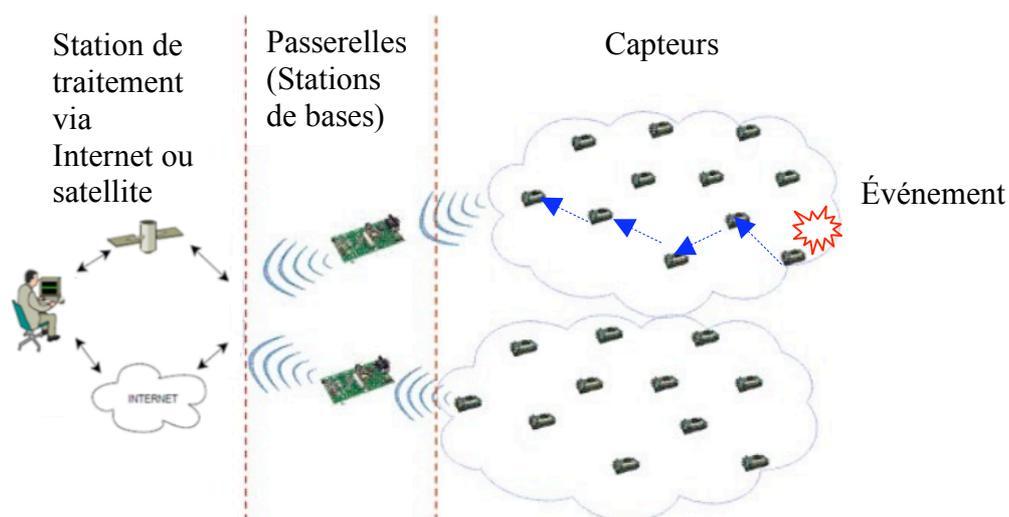


Figure I.2 : Exemple d'architecture d'un RCSFs

Comme le montre la figure 2, un réseau de capteurs est composé d'un grand nombre de capteurs déployés dans une zone d'intérêt. Lors de l'apparition d'un événement (phénomène), les nœuds coopèrent entre eux pour envoyer les informations captées à travers une architecture multi sauts au nœud puit. Ce dernier transmet ces données via un réseau de communication Internet ou par satellite au centre des traitements pour les analyser et si nécessaire prendre des décisions.

I.3.2 Pile protocolaire de communication dans un RCSFs

La pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil reprend celle du modèle OSI à un détail près. Dû aux différentes caractéristiques et contraintes que présentent les réseaux de capteurs sans fil comme la mobilité et la conservation de l'énergie, celle-ci intègre la prise en charge du problème de consommation d'énergie et le traitement données avec les protocoles de routages, ainsi qu'elle facilite la coopération entre les capteurs. Elle inclut trois plans de gestion [ASSC02]. Elle est principalement composée de cinq couches : application, transport, réseaux, liaison de données et physique.

- **Plan de gestion d'énergie** : ce plan permet de aux capteurs de gérer leurs énergies pour une longue durée de vie.
- **Plan de gestion de tâches** : il permet d'ordonnancer et assurer un équilibrage de charge entre les capteurs suivant son domaine d'application.
- **Plan de mobilité** : il gère la détection et la sauvegarde des mouvements des capteurs dans la zone d'intérêt, de telle sorte que les capteurs garde un historique sur les routes et l'emplacement des capteurs adjacents.

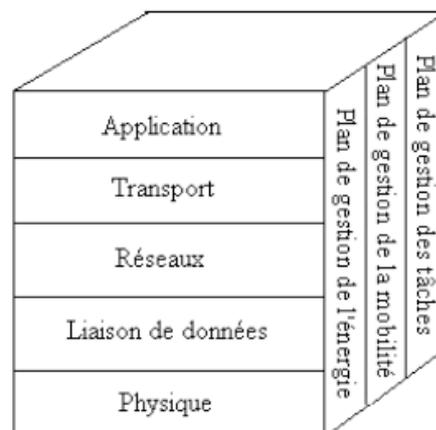


Figure I.3 : Pile protocolaire

1.4 Domaines d'application des RCSFs

La taille de plus en plus réduite des micros capteurs, le coût de plus en plus faible, la large gamme des types de capteurs disponibles (thermiques, optiques, vibrations,...) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'application.

Récemment, un état de l'art publié par [YMG08] a fait une classification des domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil. Elle est illustrée par la figure 4 suivante.

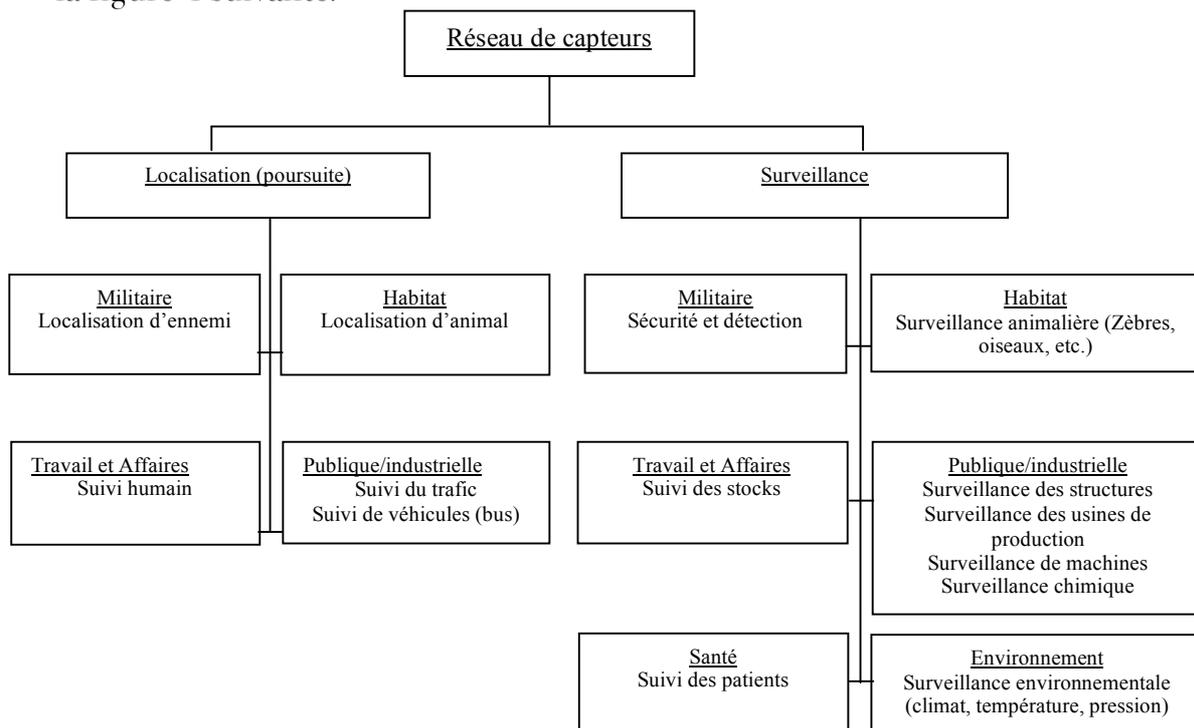


Figure I.4 : Classification des domaines d'application des RCSFs

I.4.1 Applications Militaires

Le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Ses caractéristiques comme le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto organisation, la tolérance aux pannes l'ont rendue indispensable et un outil appréciable pour la surveillance, l'analyse du terrain ou la détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations [ISKDPKBM04]. Des tests concluants ont été réalisés par l'armée américaine dans le désert du Nevada.

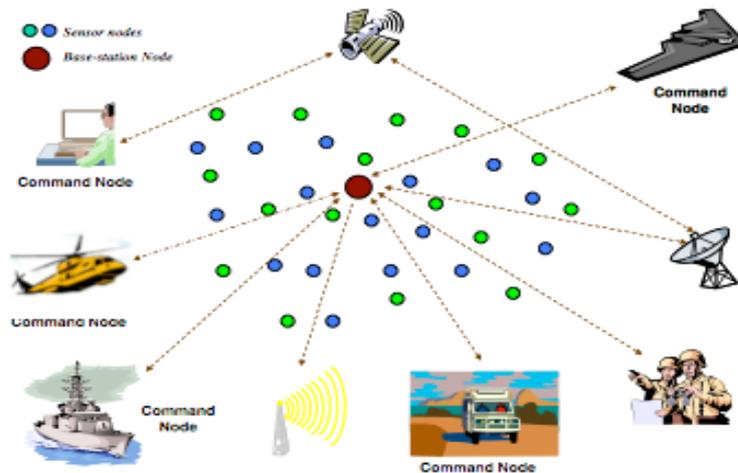


Figure I.5: Application de surveillance et d'intervention militaire.

I.4.2 Applications environnementales

Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour surveiller les changements environnementaux. Une fois disséminés dans la nature, ils peuvent détecter des événements comme les feux de forêts, les tempêtes, les inondations, le degré de pollution des déchets industriels. Le recours à cet outil permettra aisément une intervention beaucoup plus rapide et efficace des équipes de secours.

La NASA a élaboré un projet (Volcano SensorWeb) portant sur la surveillance des volcans pilotés par une application web [Web4].

I.4.3 Applications Médicales

Le recours aux réseaux de capteurs sans fil en médecine pourrait apporter une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations sur la glycémie, la détection précoce des cancers, le diagnostic de quelques maladies, *etc.* Les micros capteurs dotés de caméras sont à même de transmettre des images de l'intérieur du corps d'un patient sans faire recours à la chirurgie.



Figure I.6 : Suivi des battements de cœur d'un patient

I.4.4 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs au processus de stockage et de livraison dans le domaine commercial. Il devient alors possible pour un client et les entreprises manufacturières de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré.



Figure I.7 : Suivi de la production d'un produit.

I.4.5 Habitat

Les réseaux de capteurs sont déployés pour le contrôle et la détection des problèmes structuraux dans les bâtiments et les immeubles. Ceci facilite la tâche de maintenance des édifices et permet d'empêcher les désastres.

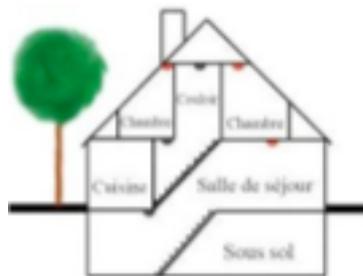


Figure I.8 : Surveillance d'une bâtisse

I.5 Applications des RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil ont été classés parmi les 21 technologies les plus importantes du 21^{ème} siècle [Web2]. En effet, la recherche dans le domaine des capteurs est en train de vivre une révolution importante, ouvrant des perspectives d'impacts significatifs dans de nombreux domaines. Ainsi, nous classifions les applications des RCSFs en quatre classes d'applications : orientées temps, orientées événements, orientées requêtes et hybride [MI05].

I.5.1 Applications orientées temps

Elles représentent les applications où l'acquisition et la transmission des données capturées sont liées au temps : instant précis. La période d'acquisition peut être de quelques secondes jusqu'à quelques heures voire des jours, en fonction de l'application envisagée. La collecte de données environnementales peut représenter un bon exemple de cette classe

d'application dans un domaine tel que : l'agriculture.

I.5.2 Applications orientées événements

Dans ce cas, les capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit. Un exemple simple est celui de la surveillance des feux dans les forêts où un capteur envoie des alertes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil. Au départ, cette classe a été utilisée spécialement à des fins militaires, comme la surveillance du déplacement d'objets dans le champ de bataille.

Actuellement elle est utilisée dans d'autres domaines comme la médecine (contrôle médical des patients), la surveillance d'édifices (ponts, barrages, etc.), etc. [MA02].

I.5.3 Applications orientées requêtes

Dans ce cas, un capteur envoie de l'information uniquement suite à une demande explicite de la station de base. Cette classe d'application est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur. Ce dernier peut requérir des informations à partir de certaines régions dans le réseau ou interroger les capteurs pour acquérir des mesures d'intérêts. Dans ce cas, des connaissances sur la topologie du réseau et l'emplacement des capteurs sont nécessaires. [MB08]

I.5.4 Applications hybrides

Ce type d'application met en œuvre les trois modes de fonctionnement décrits précédemment. Par exemple, dans un réseau conçu pour le suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau de surveillance et un réseau de collecte de données par événements, etc.

1.6 Facteurs et contraintes des RCSF

La conception et la réalisation des réseaux de capteurs sans fil sont influencées par plusieurs facteurs. Ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSFs.

I.6.1 Durée de vie du réseau

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

I.6.2 Ressources limitées

En plus de l'énergie, les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse.

I.6.3 Bande passante limitée

Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s.

Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

I.6.4 Facteur d'échelle

Le nombre de nœuds déployés pour une application peut atteindre des milliers. Dans ce cas, le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues [ASC02].

I.6.5 Tolérance aux pannes

Plusieurs pannes peuvent apparaître dans les différentes couche d'un système de RCSF. Pour pallier ces problèmes, il est utile d'implémenter un système qui permet de surveiller le réseau a tout moment. Ce système doit être capable d'offrir l'état opérationnel des différents équipements et d'établir un mécanisme qui permet la tolérance aux fautes [KS78]. La tolérance est la technique qui rend le système capable de produire un bon service même en présence de phénomènes accidentels tels que des perturbation environnementale, panne matérielles ou des pannes conceptuelles particulièrement des bugs.

I.6.6 Agrégation de données

Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données. Avec cette technique, les nœuds intermédiaires agrègent l'information reçue de plusieurs sources. Cette technique est connue aussi sous le nom de fusion de données.

I.6.7 Homogénéité et hétérogénéité du RCSFs

Les capteurs qui constituent le réseau de capteurs sans fil peuvent être homogènes ou hétérogènes. Selon les capteurs, on distingue deux types de réseaux.

- **Un réseau hétérogène :** Les nœuds du réseau ont des caractéristiques distinctes, comme le rayon de capture, la capacité de calcul, la portée de transmission, etc.

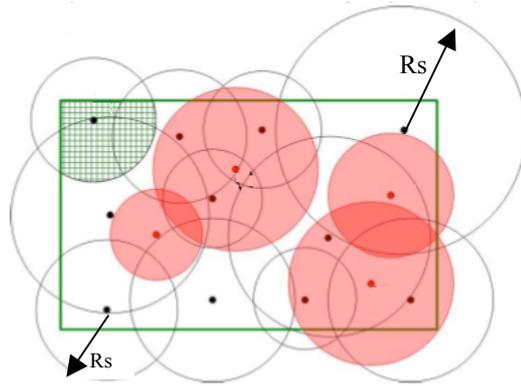


Figure I.9 : Réseau hétérogène

- **Un réseau homogène** : Tous les capteurs sont homogènes en termes de complexité matérielle (même caractéristiques) et logicielle.

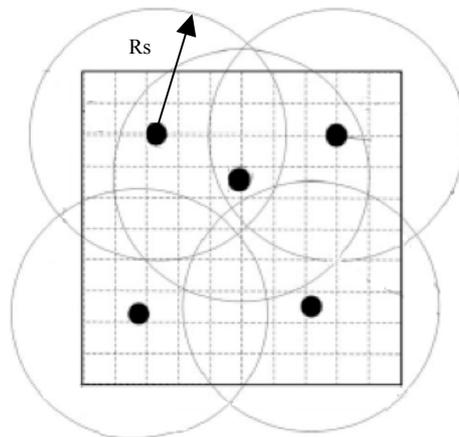


Figure I.10 : Réseau homogène

I.7 Les topologies des RCSFs

La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps pour les raisons suivantes : la défaillance d'un nœud capteur à cause de l'hostilité de l'environnement, la non disponibilité d'un nœud capteur à cause de l'épuisement de son énergie, etc. Pour ces raisons, le recours au déploiement est indispensable [ASSC02]. On peut citer trois phases de déploiement :

I.7.1 Le pré-déploiement

Généralement les capteurs sont déployés par deux façons ; aléatoires et déterministes. Dans le cas d'un déploiement aléatoire, le plus souvent on fait un largage aérien et cela sans prendre en considération les distances entre les capteurs.

Pour le déploiement déterministe, généralement un plan est établi avec connaissance des positions des capteurs au préalable.

I.7.2 Le post-déploiement

Une fois que la phase de déploiement est terminée, la topologie initialement conçue peut subir des changements. Ces derniers sont causés par la nature de l'environnement qui présente des obstacles, des événements comme l'épuisement de batteries ou attaques infligeant des défaillances matérielles.

I.7.3 Le re-déploiement

Le besoin d'assurer une surveillance continue et une disponibilité de service oblige à remplacer les capteurs défaillants. Ce qui entraîne une réorganisation du réseau.

I.8 Problématiques dans les RCSFs

Le domaine des réseaux de capteurs a soulevé plusieurs problématiques et perspectives de recherche. Parmi lesquelles, nous citons :

I.8.1 Routage

Il consiste à choisir un chemin d'un nœud source vers un nœud destinataire de manière à passer par le minimum de nœuds intermédiaires, et cela suivant certaines métriques de performances à savoir : la consommation d'énergies, le choix des routes optimales et la délivrance des paquets.

I.8.2 Sécurité

Pour les applications qui exigent un niveau de sécurité élevé (l'exemple des applications militaires) des mécanismes d'authentification, de confidentialité, et d'intégrité doivent être mis en place en tenant compte des ressources limitées que présentent les réseaux de capteurs sans fil.

I.8.3 Couverture

La fonction principale d'un capteur est de surveiller son environnement local, la couverture devient une problématique principale des réseaux de capteurs sans fil. Elle doit être réalisée avec un minimum de nœuds capteurs déployés pour assurer la longévité du réseau. C'est l'un des critères d'évaluation de la qualité de service (QoS) dans les réseaux de capteurs sans fil.

I.8.4 Connectivité

Pour des considérations de routage, l'acheminement des informations collectées par les nœuds capteurs déployés nécessite que le réseau soit connecté. La connectivité est la propriété d'avoir au moins un chemin entre chaque paire de capteurs et la station de base.

I.8.5 Énergie

Dès lors que longévité du réseau est étroitement liée à l'énergie qu'il

consomme, alors il est primordial de la conserver et de l'épuiser de façon équitable et sans gaspillage afin d'assurer la fonction qu'on lui a assigné et par le même avoir un service continu.

1.8.6 Diffusion de l'information

Les protocoles de diffusion, conçus pour les réseaux de capteurs, doivent assurer une couverture maximale des capteurs composant le réseau, d'une telle façon à minimiser le nombre des réémissions et des réceptions redondantes des messages ainsi que la minimisation de la consommation d'énergie.

1.9 Problèmes de couverture

1.9.1 Problème de couverture dans les RCSFs

La fonction principale d'un nœud capteur est de surveiller son environnement local et immédiat en l'occurrence d'événement d'intérêt. Pour cette raison, la couverture est le paramètre le plus important dans les réseaux de capteurs sans fil dans la mesure où elle affecte le résultat de la tâche de surveillance effectuée par le réseau. En effet, c'est la clé pour évaluer la qualité de service (QoS) d'un réseau de capteurs sans fil [CW05].

Le problème de couverture est provoqué par trois principales causes: pas assez de capteurs pour couvrir toute la zone d'intérêt, déploiement aléatoire et limitation au niveau des capteurs i.e rayon de capture limité.

La ressource limitée des capteurs en termes de batterie fait que des capteurs meurs causant ainsi une dégradation du niveau de couverture et provoque des trous de couverture [SCS06]. Toutefois, ce problème peut être anticipé par l'emploi de capteurs dans les rayons de capture sont larges, mais ce type de capteurs est très coûteux.

L'un des aspects intéressant des réseaux de capteurs sans fil et leur déploiement aléatoire sans l'intervention humaine. Ceci peut être réalisé par un largage aérien permettant ainsi une application au-delà de la nature hostile et inaccessible de certaines zones. Le problème du déploiement aléatoire se situe au niveau de la densité des capteurs qui dans certains endroits est forte tandis qu'elle est faible dans d'autres endroits. Dans ces cas, la couverture n'est pas maximisée et l'utilité des capteurs n'est pas exploitée au mieux.

La couverture redondante formée par une forte densité des capteurs peut être contrôlé en utilisant le concept d'ordonnancement. Il consiste à sélectionner et mettre en mode passif le maximum de capteurs redondant tout en laissant un certain nombre minimal de capteurs actifs pour garantir une couverture maximale de la zone d'intérêt afin de réduire la

consommation d'énergie, et donc pour une meilleure longévité du réseau.

Le problème de couverture peut être vu comme un problème de minimisation [SCS06], où l'objectif est de minimiser les trous de couverture formés par un déploiement aléatoire ou causés par la défaillance de certains capteurs.

Au-delà du déploiement déterministe et aléatoire, l'objectif est résoudre le problème de couverture grâce au placement des nœuds capteurs. Formellement, le problème peut être modélisé comme suit : étant donnée N nœuds capteurs $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ et une zone d'intérêt (ZI). Le problème alors est de trouver comment positionner les nœuds capteurs de telle sorte que la couverture est maximisée et les trous de couvertures sont minimisées.

I.9.1.1 Modélisation d'un RCSF

Formellement, un réseau de capteurs sans fil en 2D est représenté par un graphe $G = (V, E)$ avec V l'ensemble des sommets (les nœuds capteurs du réseau) et E l'ensemble des arrêtes correspondant aux liens de communications possibles. Un nœud capteur u communique avec un nœud capteur v s'il existe une paire (u, v) de E .

L'ensemble E est défini par le modèle du disque unitaire comme suit :

$$E = \{ (u, v) \in V^2 \mid u \neq v \wedge \text{distance}(u, v) < R_c \} \quad (1)$$

R_c est le rayon de communication des nœuds capteurs et $\text{distance}(u, v)$ la distance euclidienne qui sépare u de v .

u est dit connecté à v si la distance qui les sépare est dans l'intervalle de R_c ou s'il existe un chemin multi sauts composés de nœuds capteurs deux à deux connectés.

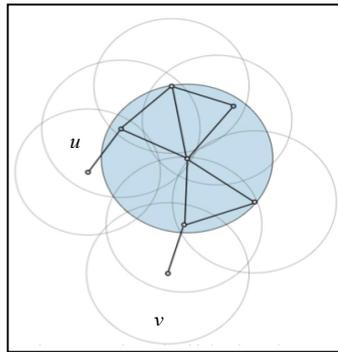


Figure I.11 : Réseau de capteurs sans fils homogène connecté.

La zone de couverture Z_c d'un capteur u est souvent admise dans la littérature comme étant circulaire de rayon R_s (rayon de surveillance ou de capture) de centre u , c'est le modèle de capture en disque.

$$Z_c = \{ p \in ZI \mid \text{distance}(u,p) < R_s \} \quad (2)$$

où :- p est un point physique dans Z_c .

- $\text{distance}(u,p) = \sqrt{(x_u - x_p)^2 + (y_u - y_p)^2}$.

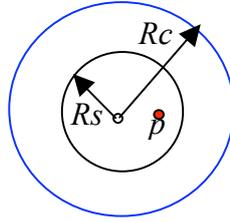


Figure I.12 : Zone de perception d'un capteur.

I.9.1.2 Modèles de capture

Généralement les capteurs ont différentes caractéristiques théorique et physique, ceci a conduit les chercheurs à proposer plusieurs modèles de complexité différente suivant les exigences des applications et l'environnement. Les modèles les plus cités dans la littérature et les plus utilisés sont le modèle booléen et le modèle probabiliste [ZZSH12, WLC07].

- **Le modèle booléen :**

Il est le modèle le plus simple, selon que le capteur est capable de capturer uniquement les événements ou les points qui sont à l'intérieur de son rayon de capture mais pas au-delà. Dans ce modèle le rayon de capture de chaque capteur est confiné à l'intérieur d'un disque de rayon R_s (souvent appelé rayon de capture).

$$C_{xy}(S_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(S_i, P) < R_s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3)$$

- **Probabiliste**

Le modèle probabiliste est sans doute le plus réaliste. Il peut être vu comme une extension du modèle booléen.

$$C_{xy}(S_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } R + R_e \leq d(S_i, P) \\ \exp - \alpha^\beta & \text{si } R - R_e < d(S_i, P) < R + R_e \\ 1 & \text{si } R - R_e \geq d(S_i, P) \end{cases} \quad (4)$$

Tel que :

- $R_e (R_e < R)$ est la mesure de l'incertitude de capture.
- $\alpha = d(S_i, P) - (R - R_e)$, α et β sont des paramètres qui mesurent la probabilité de détection lorsqu'un point est à une distance supérieure à R_e .
- $d(S_i, P) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y_i-y)^2}$ est la distance euclidienne entre le capteur S_i et le point P .

La figure suivante montre les variations des paramètres α et β qui influe sur la probabilité de détection [ZZSH12].

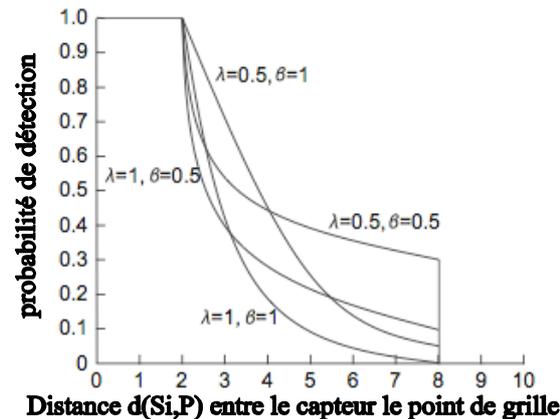


Figure I.13: Modèle de détection probabiliste

I.9.1.3 Formulation du problème de couverture

Plusieurs critères ont été utilisés pour la classification des différentes formulations du problème de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, on retrouve celle de Cardei et Wu [CW05] et également quelques critères de [ZZSH12].

I.9.1.3.1 Objectif visé

Dès lors que la durée de vie d'un réseau est étroitement liée à la quantité d'énergie qu'il consomme, il devient primordial de l'utiliser convenablement et sans gaspillage. L'optimisation énergétique est la contrainte de base dont il faut tenir compte lors de la résolution des problématiques que pose les réseaux de capteurs sans fil. L'idéal est d'avoir les batteries des capteurs épuisés équitablement lors d'une quelconque application

I.9.1.3.2 Nature des algorithmes

Dans les réseaux de capteurs sans fil, la capacité à émettre et recevoir des données permettent le contrôle et la décision à travers les capteurs mais aussi d'effectuer des tâches de façon coopérative [BNL09], elles sont basées sur trois classe d'algorithmes différentes décrites comme suit :

- **Algorithme centralisé** : est un algorithme qui s'exécute sur une station de base qui requiert une connaissance globale du réseau. Ce

genre d'algorithme n'est pas pratique à cause du coût qu'il engendre.

- **Algorithme distribué** : est un algorithme qui s'exécute sur différents capteurs et qui emploie le paradigme d'envoi et réception de messages.
- **Algorithme localisé** : dans ce type d'algorithme, un capteur prend des décisions en se basant uniquement sur des informations obtenues localement au niveau de son voisinage au lieu de connaissances globales. Ici, le mot localisé réfère à la perception propre d'un capteur de son environnement.

I.9.1.3.3 Méthodes de couverture

La plupart des méthodes citées dans la littérature [NKW09] pour la résolution du problème de couverture se classifient en trois catégories ; méthodes basées sur les forces, méthodes basées sur le principe des grilles et les méthodes qui font appel à la géométrie euclidienne.

Les méthodes basées sur les forces utilisent le concept des forces [HV03] pour déterminer les positions optimales des capteurs.

I.9.1.3.3.1 Méthodes géométriques

La résolution du problème de couverture fait largement appel aux méthodes géométriques qui au moyen de leurs modèles mathématiques et fondements théoriques permettant une résolution efficace. En effet, les méthodes géométriques les plus citées dans la littérature [NKW09, SLA06] sont la Triangulation de Delaunay et le diagramme de Voronoi [RNRH11] issus des travaux des deux mathématiciens russes Boris Delaunay et Georgi Fedoseevich Voronoï.

- **Diagramme de Voronoi**

Le diagramme de Voronoi est la partition de la zone d'intérêt en sites de telle sorte que les points qui se trouvent à l'intérieur d'un polygone sont très proches du site à l'intérieur du polygone que d'autres polygones. Par conséquent, le diagramme de Voronoi (figure 14) peut être utilisé comme la méthode la plus simple pour déterminer la couverture du réseau de capteurs sans fil ; en considérant les capteurs comme des sites, si toutes les arêtes des polygones de Voronoi sont couvertes alors la région d'intérêt est complètement couverte sinon des trous de couverture existent [KTGH06, RNRH11]. Formellement, le diagramme de Voronoi est défini par les cellules $V(p_i)$:

$$V(p_i) = \{ x : |p_i - x| \leq |p_j - x|, \forall j \neq i \} \quad (5)$$

$V(p_i)$ se compose de tous les points qui sont près de P_i que n'importe quel endroit. L'union des $V(p_i)$ forme le diagramme de Voronoi .

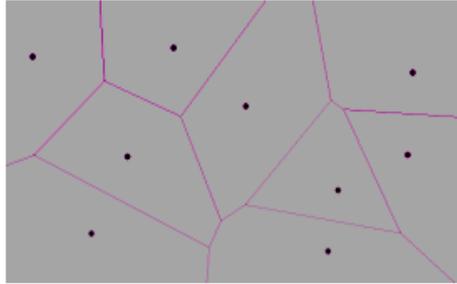


Figure I.14 : Diagramme de Voronoi

- **Triangulation de Delaunay**

La triangulation de Delaunay est le dual du diagramme de Voronoi [AR00].

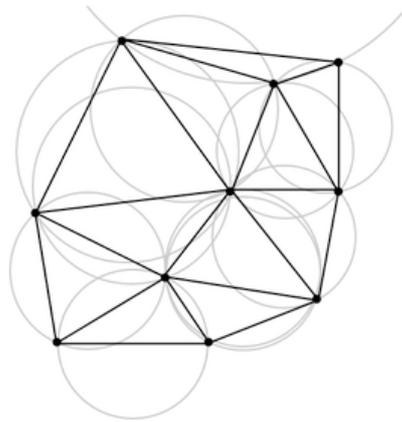


Figure I.15 : Triangulation de Delaunay

Elle a été utilisée par [MKPS05] pour estimer la meilleure qualité de couverture (Best and Worst case). L'objectif de cet article est de repérer le chemin de soutien par lequel un intrus peut passer avec la plus faible probabilité de détection et par la même estimer les positions des capteurs additionnels devant être ajoutés pour améliorer et augmenter le taux de couverture. Elle a été également utilisée par [WLC07] pour estimer les meilleures positions de redéploiement de capteurs en présence d'obstacles.

D'autres méthodes géométriques sont également utilisées comme : le plus grand cercle vide, le problème du cercle couvrant. Nous renvoyons le lecteur à [SS11] pour d'amples détails.

I.9.1.3.3.2 Méthodes des Grilles

Contrairement aux méthodes géométriques (diagramme de Voronoi et la Triangulation de Delaunay), la méthode basée sur la grille consiste à diviser la zone d'intérêt en cellules de taille $(d*d)$ où les capteurs seront placés à l'intérieur soit aux centres, soit dans des positions aléatoires. Le problème de cette approche est le choix de la dimension de la cellule. Elle a un impact direct sur l'évaluation du taux de couverture. La figure suivante montre des capteurs (en rouge) placés sur une grille de façon aléatoire.

Elle a été utilisée par Chen [CWT08] pour la sélection d'un certain nombre de capteurs actifs parmi l'ensemble des capteurs déployés.

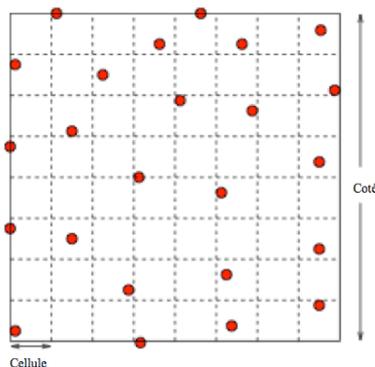


Figure I.16: Déploiement aléatoire de capteurs sur une grille bidimensionnelle

Il existe dans la littérature d'autres méthodes dites analytiques et méthodes à base de forces. Dans notre mémoire, on s'intéresse uniquement aux méthodes géométriques.

I.9.1.3.4 Stratégies de couvertures

En se référant à [ZZSH12], la couverture est classifiée selon que des capteurs mobiles sont présents ou pas dans le réseau de capteurs sans fil. Cette classification présente deux aspects principaux : statique et dynamique.

- **Couverture statique**

La couverture statique est souvent assimilée au problème de la galerie d'art où il s'agit de trouver le nombre de gardes ainsi que leurs positions optimales de telle sorte que chaque point puisse être surveillé par au moins un garde. Dans les réseaux de capteurs sans fil, il s'agit d'une couverture avec des capteurs fixes.

- **Couverture dynamique**

Dans ce type de couverture des capteurs mobiles sont présents dans le réseau afin d'améliorer les performances du réseau et assister le routage.

I.9.1.3.5 Types de couvertures

Le concept de couverture a été initialement introduit par Gage [G92] en 1992, il l'a classifié en trois types : couverture de zone, couverture de barrière et couverture de points.

- **Couverture de zone**

Où l'objectif est d'obtenir le taux de détection maximal à travers une région donnée.

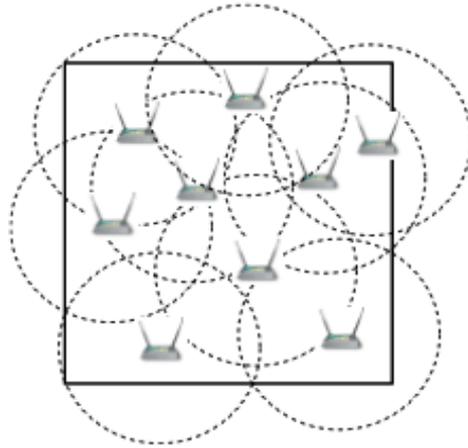


Figure I.17 : Couverture de zone

- **Couverture de frontière**

Où l'objectif est de minimiser la probabilité de la non-détection à travers la frontière. Ce genre de couverture est notamment utilisé pour la détection d'intrus.

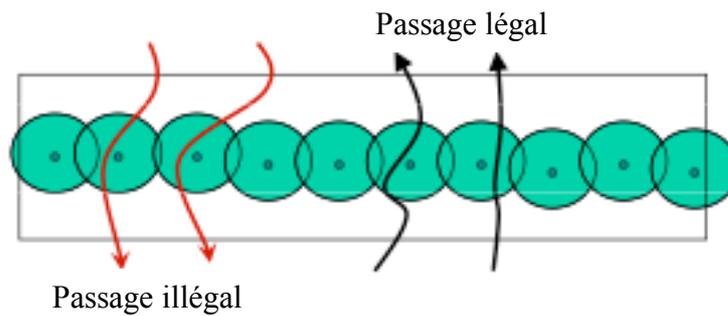


Figure I.18 : Couverture de frontière

- **Couverture de points (cibles)**

Dans ce type de couverture, l'objectif est de couvrir un ensemble de points d'intérêt ou cibles. Ce type de couverture est notamment utilisé a des fins militaires [AD04, ISKDPKBM04].

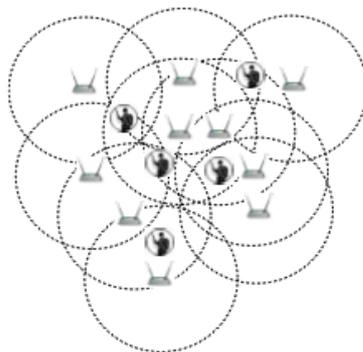


Figure 19 : Couverture de points (cibles)

I.9.1.3.6 Type du déploiement

La couverture peut être classifié également comme étant déterministe ou stochastique (également appelé aléatoire) et incrémentale (s'il y a lieu) par la manière avec laquelle les capteurs sont déployés.

- **Déterministe** : Les capteurs sont déployés en des endroits préalablement planifiés et connus soit de façon manuelle ou par l'emploi de robot mobiles [DL05,MA10].
- **Aléatoire** : Les capteurs sont aléatoirement dispersés à cause de l'hostilité d'environnement (Champs de batailles, endroit inaccessibles).

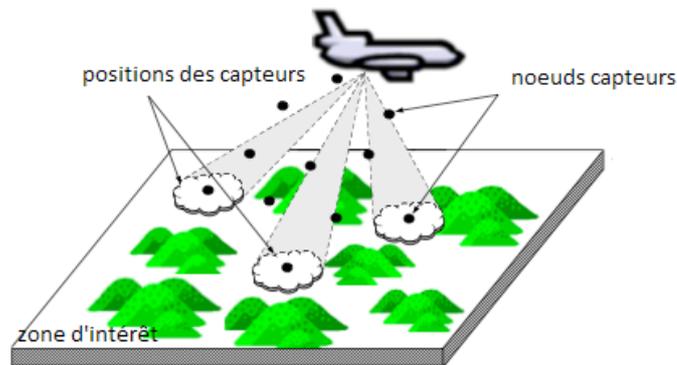


Figure 20 : Largage aérien des nœuds capteurs dans un environnement hostile

- **Incrémental**: Les capteurs sont déployés au fur et à mesure sur la zone à couvrir.

I.9.1.3.7 La couverture simple et multiple

Suivant l'application envisagée, la couverture peut être divisé en deux types : couverture simple et multiple. Étant donnée un ensemble de capteurs déployés dans une zone d'intérêt et k un entier positif appelé *degré de couverture* ou *niveau de couverture*. Lorsque $k = 1$ on parle de couverture simple ou *1-couverture* dans laquelle des phénomènes sont surveillés au moins par un capteur.

Une zone est dite avoir une couverture de *niveau k* ou *k -couverte* si tout point de cette zone est à l'intérieur des rayons de surveillance de k -capteurs actifs distincts [SCC08].

Dû à la durée de vie limitée des capteurs et à l'infaisabilité de remplacement de batteries sur une dizaine de centaines de capteurs, certaines applications requièrent que $k > 1$ pour réduire l'influence de la défaillance des capteurs [KHMD09].

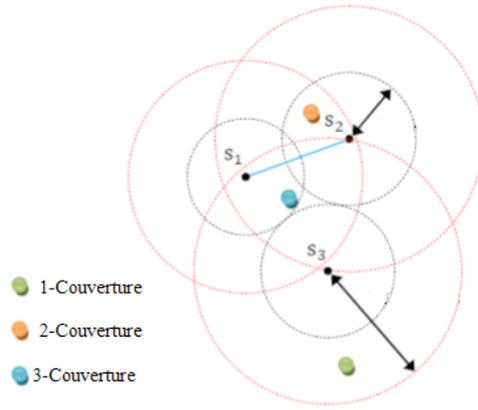


Figure 21 : Différents niveaux de couverture

I.9.1.3.8 Métriques d'évaluation de la couverture

Plusieurs métriques sont citées dans la littérature pour évaluer la couverture [HV03, SCC08, NKW09] selon la nature du réseau et les capteurs qui le forment. Dans la plupart des publications, on retrouve le taux de couverture et le taux de la k-couverture [SCC08].

La première est définie comme étant le pourcentage de couverture i.e le rapport des régions couvertes sur la zone d'intérêt [SCS06]. Soit A_i la zone couverte par un capteur $i \in [1..N]$ et A la zone d'intérêt, alors le pourcentage est défini par la formule suivante :

$$C = \frac{\cup \{A_i\}}{A}. \quad (6)$$

La seconde est définie par le pourcentage des régions k couvertes relatives à la zone d'intérêt. [SCC08]. D'autres métriques telles que : l'uniformité, le temps et la distance sont utilisés pour l'évaluation des performances des réseaux de capteurs mobiles [HV03].

I.9.1.3.9 Type du rayon de couverture

La plupart des travaux qu'on rencontre dans la littérature supposent que le rayon de capture est fixe. Or, la réduction du rayon de couverture peut contribuer à économiser de l'énergie, il est généralement employé pour la couverture de cibles. L'idée clé d'adapter le rayon de couverture c'est de réduire les chevauchements entre les capteurs tout en maintenant une qualité de service au-dessus d'un niveau prédéfini. Peu de travaux considèrent le rayon de couverture variable.

I.9.1.3.10 Relation entre la couverture et la connectivité

Il est clair que la connectivité requiert seulement qu'un capteur actif ait à l'intérieur du rayon de communication d'un capteur ou plusieurs [ZZSH12] de telle sorte que les capteurs forment un réseau connecté. La

condition suffisante pour la 1-couverture d'impliquer la connectivité quand le rayon de communication est deux fois plus que le rayon de couverture est démontrée par [ZH04]. Sans cette hypothèse, la couverture ne garantirait pas la connectivité.

I.9.1.4 L'ordonnancement

Le déploiement aléatoire des capteurs dans une zone d'intérêt provoque une distribution non uniforme. Ceci laisse présager que certaines régions sont plus denses que d'autres, ce qui provoquera par la suite la couverture redondante. Ce genre de problème nécessite l'ordonnancement (figure 22). Ce dernier consiste à mettre certains capteurs déployés en mode passif et laisser les autres en mode actifs afin d'équilibrer les énergies des capteurs et par la même étendre la durée de vie du réseau tout en garantissant une couverture totale de la zone d'intérêt avec un nombre minimal de capteurs.

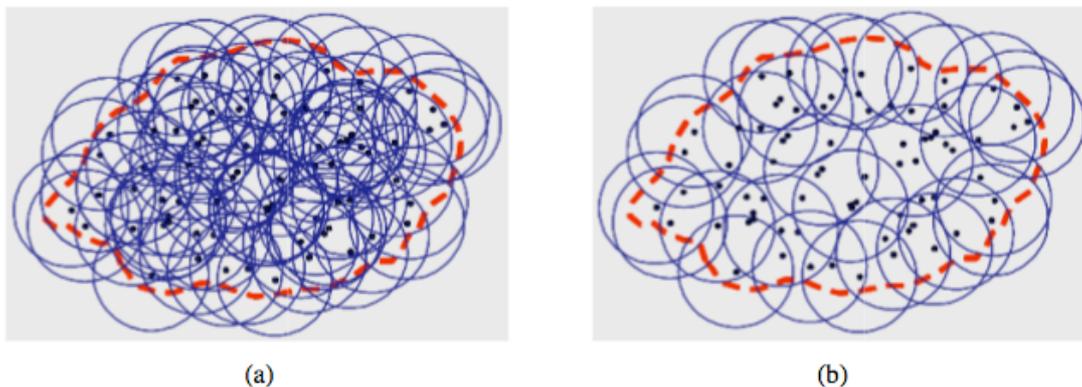


Figure 22 : Ordonnancement d'activités des nœuds capteurs [[AG07]]

(a) : Tous les capteurs sont actifs

(b) : Uniquement une partie est active

I.9.1.5 La consommation énergétique

La consommation énergétique est l'une des contraintes essentielles qui doit être prise en considération lors de la conception d'algorithmes pour les réseaux de capteurs sans fil afin de mieux la diminuer (une stratégie de consommation doit être suivie par les différents capteurs constituant le RCSF). Au niveau du capteur, la consommation énergétique est causée principalement par : la capture, le traitement et la communication.

I.9.1.6 La connectivité

Une fois les capteurs sont déployés dans la zone d'intérêt, ils forment un réseau de communication, qui peut changer dynamiquement à travers le temps, dépendant de la topologie de la région géographique, séparation inter nodales, énergies résiduelles des capteurs, obstacles statiques et mobiles, présences de bruits, etc.

Un réseau de capteur sans fil est connecté si et seulement s'il existe au moins un chemin entre chaque paire de nœuds dans le réseau. La connectivité dépend principalement de l'existence d'un chemin. Elle est affectée par le changement de la topologie du réseau dû à la mobilité, défaillance de capteurs, attaques, *etc.* Ceci inclut aussi la perte de liaison, l'isolation des capteurs, le partitionnement du réseau, la mise à jour des chemins et le re-routage.

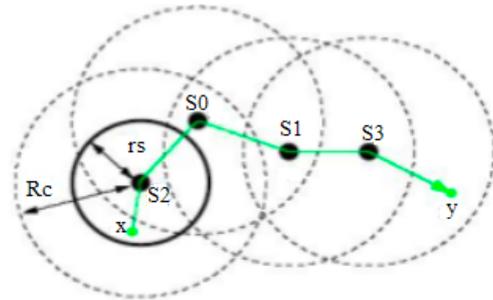


Figure 23 : Connectivité dans un RCSFs

I.9.1.6.1 Type de connectivité

Au-delà de la couverture, la connectivité est également importante dans les réseaux de capteurs sans fil. En effet, si un réseau est modélisé par un graphe avec comme sommets les capteurs et les arêtes les liens de communication, s'ils existent, entre chaque paire de sommets, le réseau est dit *connecté* i.e il existe un chemin de communication à un saut ou multi sauts constitués des arrêtes du graphe.

Par analogie à la propriété de degré de couverture, un réseau possède également la propriété de degré de connectivité. De cela découle de types de connectivité.

a. Connectivité simple (*1-connectivité*)

Un réseau de capteurs sans fil est dit *1-connecté* si pour chaque paire de capteurs, il existe une arête à un saut qui les relie.

b. Connectivité multiple (*k-connectivité*)

Un réseau de capteurs sans fil est dit avoir une *k-connectivité* si la suppression des (*k-1*) capteurs ne rend pas le réseau de communication déconnecté (également séparé). [W03]

Un fondement théorique a été formulé par [ZH04] qui stipule que pour avoir la connectivité en plus de la couverture, il faut que le rapport entre le rayon de communication sur le rayon de surveillance (capture) soit égal à 2.

En général, la connectivité d'un réseau de capteurs sans fil est calculée par la formule suivante [ASSC02, ACG12]:

$$\mu(Rc) = N * Rc * \pi / A. \quad (7)$$

Où :

R_c est le rayon de communication

N le nombre de nœuds capteurs

À la zone d'intérêt.

$\mu(R_c)$ est la connectivité.

Kleinrock et al. [KS78] ont démontré que lors que $\mu(R_c)$ atteint la valeur 6, le réseau forme un graphe connecté.

I.10 Conclusion

Ce chapitre a été axé sur la présentation des concepts fondamentaux des réseaux de capteurs sans fils tout en survolant le problème de couverture et les différentes méthodes utilisées.

Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des technologies qui suscitent un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : santé, environnement, industrie. Néanmoins, cet intérêt est confronté à plusieurs problématiques comme la couverture et la connectivité. Ces deux problématiques présentent des défis non encore résolus comme la surveillance efficace d'une zone d'intérêt et la communication continue entre les différents capteurs qui forment le réseau.

L'objectif du chapitre suivant est de décrire certaines solutions proposées dans la littérature pour résoudre un tel problème et de dresser une comparaison selon différents critères.

Chapitre 2

État de l'art sur les méthodes de couvertures dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

II.1 Introduction

La conception d'algorithmes spécifiques aux réseaux de capteurs sans fil a attiré l'attention d'un grand nombre de chercheurs dans le domaine, ceci est dû principalement à l'avenir brillant et intéressant que promet le monde des technologies de l'information. La couverture est l'un des aspects les plus importants dans les réseaux de capteurs sans fil et plusieurs approches ont été proposées pour la maximiser.

Ce chapitre présente un état de l'art sur les algorithmes de couvertures notamment ceux qui sont basés sur les méthodes géométriques qui résolvent ce problème dans les réseaux de capteurs sans fil.

Il fournit une classification de ces approches suivant l'état de l'art effectué récemment par Cardei et al. [CW05] combiné avec celui de Zhou et al. [ZZSH12], ainsi une comparaison entre les approches étudiées par rapport à un ensemble de critères. Nous nous référons au [ZZSH12] suivant la stratégie de déploiement effectué selon qu'il existe des capteurs mobiles ou pas dans le réseau des capteurs sans fil.

Nous terminons ce chapitre par une conclusion.

II.2 Stratégie de couverture

II.2.1 Couverture statique

Le problème de la galerie d'art (O'Rourke, 1987) est l'un des problèmes qui traitent comment déterminer le nombre d'observateurs et leurs emplacement pour couvrir une salle de la galerie de telle sorte que chaque point puisse être observé par un garde. Dans ce problème, il est question de couverture statique.

Rahmani et al. [RNRH11] ont proposé une nouvelle approche combinant le diagramme de Voronoi avec les algorithmes génétiques pour le placement des capteurs afin de couvrir et surveiller un phénomène dans une zone prédéterminée. L'approche se déroule en deux étapes.

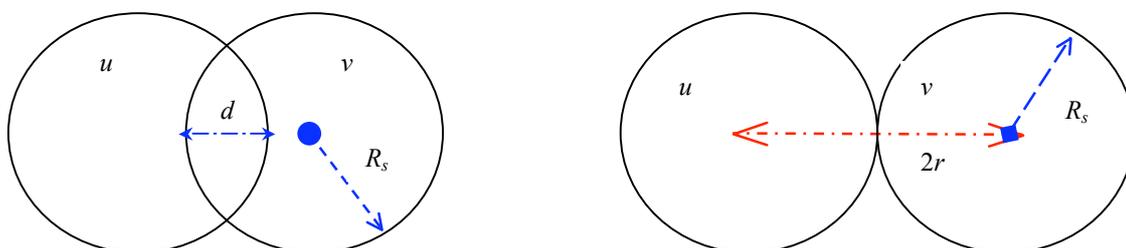
La première étape comprend deux phases :

- Durant la première phase, les capteurs de nature homogène sont déployés pour former un réseau statique où tous les capteurs une fois opérationnels reste dépourvus de tout mouvement.
- La deuxième phase intervient pour la construction du diagramme de Voronoi. Ce diagramme divise la zone en cellules (pas nécessairement de même dimensions). Les trous de couvertures existants sont éliminés par l'ajout de capteurs mobiles.

La deuxième étape permet de sélectionner les meilleures positions à l'intérieur des cellules afin de guérir les trous de couvertures (zones non couvertes) présents tout en minimisant le nombre de capteurs. Des capteurs mobiles seront placés exactement en ces points tout en garantissant une couverture maximale.

Le placement des capteurs mobiles est régi par la fonction *fitness* de l'algorithme génétique proposé. Cette fonction est utilisée pour déterminer les meilleures positions avec un gain considérable en couverture tout en garantissant moins de chevauchements avec les capteurs déjà en places. La fonction *fitness* attribue des pénalités pour chaque couple de capteurs se chevauchant avec une distance d . Il existe une forte corrélation entre cette distance et la valeur de la fonction *fitness*. La couverture totale est calculée à base de ces pénalités. Une batterie de tests a permis de montrer qu'un taux de couverture de 95.5% est atteint.

Les figures suivantes montrent l'existence (respectivement l'absence) d'un chevauchement provoqué par le placement d'un capteur u à une distance d d'un capteur v déjà en place. La distance d est évaluée à $2 * R_s - \text{Dist}(u,v)$ où Dist est la distance euclidienne entre u et v .



- a-) Capteurs avec chevauchement b-) Capteurs sans chevauchement (d étant nulle)

Figure II.24 : Placement des capteurs

Chen et al. [CWT04], ont mené une étude portant sur la sélection d'un nombre de capteurs actifs parmi ceux qui sont déployés basée sur le concept de la grille. L'objectif principal étant de réduire la couverture redondante et par la même prolonger la durée de vie du réseau en économisant de l'énergie. Deux solutions, centralisée et distribuée sont proposées.

Dans l'approche centralisée, le principe est de représenter la zone de couverture par des points d'intersections issus de la grille. Faisant ainsi, les auteurs translatent et ramènent la résolution de ce problème en la sélection d'un ensemble k couvrant. Ce dernier est souvent cité dans la littérature [CLRS01] comme appartenant la classe des problèmes NP-Difficile.

Les auteurs ont proposé un algorithme glouton permettant de sélectionner l'ensemble ayant plus de points d'intersections. Néanmoins, la solution n'est pas optimale, l'algorithme sélectionne plus de capteurs actifs qu'il en faut. Afin de pallier ce problème, un modèle mathématique est avancé.

Quant à la solution distribuée, elle représente une implémentation de la précédente où chaque capteur exécute un algorithme pour former des clusters. Ils adoptent un algorithme déjà proposé pour sa faible complexité. Les auteurs considèrent le scénario où les capteurs qui forment la couverture statique du réseau est homogène avec un déploiement aléatoire. Cet article ne considère pas la connectivité.

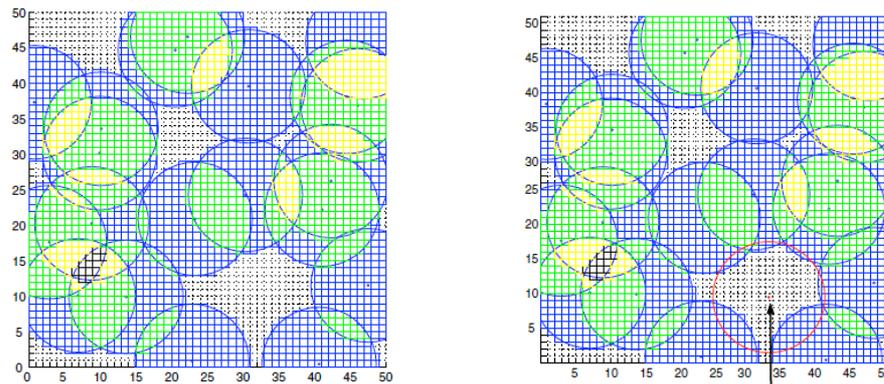
Shen et al. [SCS06], ont proposé une solution générale centralisée visant à assurer la k -couverture à base de grilles nommé la grille d'analyse avec comme contrainte l'utilisation d'un nombre minimal de capteurs.

L'approche proposée consiste à diviser la zone d'intérêt A en grilles de côté l de taille $L \times R$. Les capteurs sont placés aux centres de ces dernières. Une grille est dit k -couverte si la distance entre son centre à n'importe quel capteur est inférieure ou égale au rayon de celui-ci. Le taux de couverture total est obtenu en sommant les taux de couvertures de chaque grille k -couverte ($k \geq 1$). Afin d'éliminer les trous de couverture formés par le déploiement aléatoire, un mécanisme de re-déploiement de capteurs est proposé basé essentiellement sur la grille d'analyse afin d'obtenir un taux de la k -couverture important dans certaines régions.

Le re-déploiement des capteurs passe par une phase de recherche gloutonne des positions potentielles. Uniquement la position avec un

nombre considérable de grilles voisines non couvertes est choisie parmi celles qui sont présentes, dans un rayon r . Faisant ainsi, la position sélectionnée contribuera à un taux de couverture considérable suite au redéploiement.

Il est observé que le taux de couverture globale augmente avec l'ajout de nouveaux capteurs contrairement au autres taux de k -couverture ($k \leq 3$) qui ne dépassent pas 40%. Pour $k \geq 4$, le taux de couverture semble atteindre 30% (voir plus) avec l'emploi de 40 capteurs.



a-) déploiement aléatoire des capteurs b-) Redéploiement d'un capteur

Figure II.25 : Déploiement et redéploiement des capteurs

Wang et Medidi [WM07] ont examiné le problème de couverture avec l'emploi de capteurs dont les rayons de captures sont variables sous la contrainte d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Ils ont présenté deux heuristiques distribuées pour l'optimisation des rayons de capture et l'équilibrage d'énergie afin de contrôler la topologie de façon dynamique. Les heuristiques proposées tiennent compte de la construction de la Triangulation de Delaunay en utilisant des informations du voisinage à un saut.

La décision d'adapter les rayons de captures est prise localement par les capteurs suivant leurs informations sur la topologie.

L'approche proposée est exécutée dans un scénario aléatoire où le rapport entre le rayon de communication par le rayon de capture est supposé supérieur ou égal à 2.

Par ailleurs, il a été observé que le rayon de capture diminuait avec la densité du réseau. Aussi l'énergie était réduite de $1/3$.

Wang et al. [WM08] ont observé qu'une maille formée par des carrés ou par des triangles équilatéraux s'avérait utile pour une bonne couverture avec un minimum de chevauchement et un équilibrage de la consommation de l'énergie entre les capteurs. Or, la nature aléatoire du déploiement n'est pas idéale pour avoir ce genre de topologie. Pour pallier ce problème, ils ont

introduit la construction de deux mailles ; statique et virtuelle. Ceci est réalisé par un algorithme distribuée.

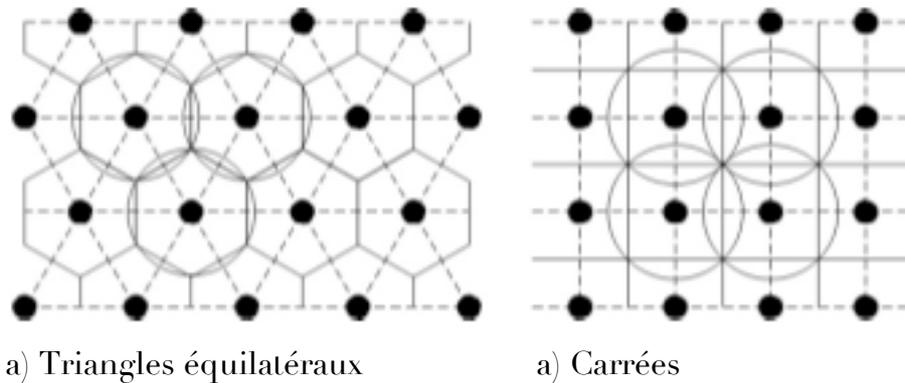


Figure II.26 : Topologie statique d'une maille

Au départ, les auteurs considèrent une maille statique qui est conçue à partir des triangles équilatéraux ou des carrés divisé par la suite en hexagones, respectivement en carrés une fois que le déploiement ait été achevé.

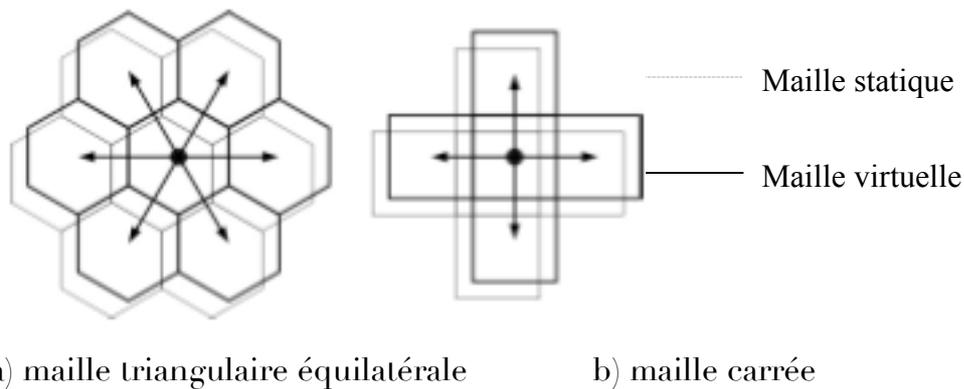


Figure II.27 : Maille statique et virtuelle

Les capteurs sont regroupés dans des clusters. Suivant que la cellule est de nature hexagone ou carrée, un capteur est sélectionné comme maître de ce cluster (cluster head) en fonction de son énergie et de son temps de service.

Par la suite, une maille virtuelle autour d'un capteur choisis aléatoirement comme initiateur est conçue. La construction commence par la diffusion d'une requête depuis l'initiateur vers le maître de chaque cluster voisin de celui-ci. Une fois que la requête est reçue, pour chaque cellule statique le maître active le capteur le plus proche du centre d'une cellule virtuelle par rapport à l'initiateur. Chaque capteur actif répète le même processus pour concevoir sa propre maille. Si un capteur proche du centre d'une cellule virtuelle est déjà actif alors le maître du groupe ignore la requête

Afin d'équilibrer la consommation de l'énergie entre les capteurs, la maille virtuelle est périodiquement reconstruite pour éviter d'utiliser le même ensemble de capteurs.

Un mécanisme de détection et de guérison des trous de couverture provoqués par la construction de la maille virtuelle est employé comme deuxième phase afin d'améliorer la couverture.

Shen et al. [SCC08], les auteurs ont proposés deux solutions qui traitent deux sous problèmes de la couverture ; le taux d'évaluation de la k-couverture et le taux du déploiement de la k-couverture.

La première, une grille uniforme a été proposée dans le cas d'un déploiement aléatoire. Pour le second, un algorithme incrémental a été suggéré.

Les auteurs ont envisagé d'améliorer l'approche [SCS06] afin d'assurer une bonne couverture avec un minimum de capteurs. À cet effet, ils ont introduit la grille pour un déploiement aléatoire.

Son principe est de diviser la grille en sous-grilles non uniformes si la division apporte un bénéfice a la k-couverture. Ensuite, grâce a quelques informations concernant ces grilles (la grille est totalement ou partiellement couverte) le taux de la k-couverture peut être au mieux évalué. Il est difficile d'évaluer le pourcentage de couverture dans le cas où les grilles seraient couvertes partiellement par au moins un capteur et totalement couvertes par moins de k capteurs différents.

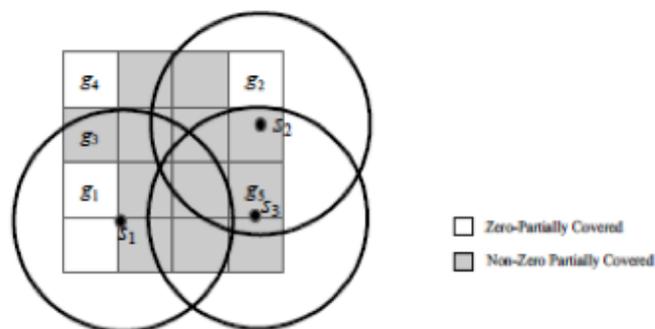


Figure II.28 : Exemples de grilles complètement et partiellement couvertes

Pour pallier ce problème, les auteurs divisent toujours ces grilles en sous-grilles (non uniforme) tant qu'elles sont partiellement couvertes. La division résulte des grilles incertaines et des grilles totalement couvertes (figure 6). Ces dernières sont ignorées.

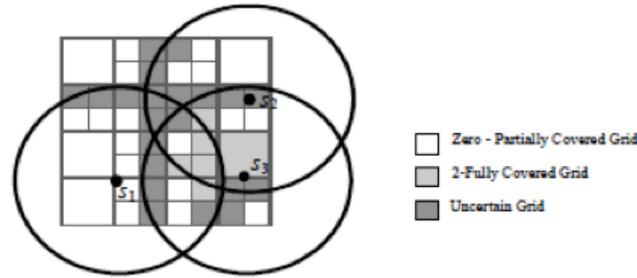


Figure II.29: Exemples de grilles non uniformes

Le processus de division continue jusqu'à avoir des grilles de petites tailles où leurs évaluations sont approximatives ce qui induit des erreurs.

Une loi est utilisée pour une évaluation maximale de ces erreurs $MME = \sum_{g \in U} |g|/|A|$ où U est l'ensemble des grilles incertaines, g la taille de la grille incertaine et A la taille de la zone d'intérêt.

L'évaluation de la k -couverture est donnée par la relation :

Taux k -couverture = $\sum_{g \in K} |g|/|A|$ Où k est l'ensemble des grilles k -couverte par au moins k capteurs différents. Il est possible d'améliorer l'évaluation de la k -couverture de la zone d'intérêt en ajoutant des capteurs additionnels. L'idée principale de ce déploiement est d'augmenter le nombre de grilles totalement couvertes. Cette solution est exécutée de manière itérative i.e déterminer a chaque itération une position où un déploiement sera effectué. Cette dernière s'appelle best-fit (déployer k -m capteurs sur le best-fit et répéter le processus jusqu'à ce que le taux de la k -couverture soit obtenu).

Wu et al. [WLC07] ont proposés de résoudre le problème de la maximisation de la couverture en présence d'obstacles. L'algorithme centralisé proposé utilise la Triangulation de Delaunay pour un déploiement déterministe des capteurs. Ils supervisent la construction de la Triangulation de Delaunay en faisant abstraction des obstacles grâce aux points ajoutés autour d'eux ainsi qu'aux alentours des frontières de la zone à surveiller.

La propriété du centre du plus grand cercle vide de la Triangulation de Delaunay est utilisée pour localiser les régions creuses de la zone de détection et pour permettre l'ajout de nouveaux capteurs afin d'améliorer le gain de couverture et par la même éliminer les trous de couvertures. L'algorithme DT-Score se déroule en deux phases.

La 1^{ère} phase :

Elle comprend deux étapes, l'initialisation et la génération de points de contour.

Dans l'étape initialisation, un fichier de configuration est engendré. Il contient une description du terrain, le nombre de capteurs ainsi que les obstacles présents dans la zone à surveiller, *etc.*

La seconde étape fait l'objet de la génération de points de contours. Au début, seulement des points sont placés autour des bordures de la zone à surveiller. Ce placement obéit à un calcul d'écart δ basé sur le rayon de capture r_s . r_s est pris entre SRange et PRange, et δ est égal à $r_s/2$.

La distance entre deux points de contour adjacent est $2r_s/\sqrt{2}$. Cette quantité garantit que les frontières soient complètement couvertes avec un minimum de capteurs. Les points qui ne sont pas avec les obstacles sont représentés par une structure de données linéaire de type vecteur. D'autres points seront placés autour des obstacles. Pour chaque obstacle, un calcul du degré d'inclinaison de pente est effectué. Si le degré est inférieur à 1, les points de contours sont placés sur l'axe des ordonnées depuis l'obstacle. Pour une pente verticale, les points de contours sont placés suivant l'axe des abscisses de l'obstacle.

La 2^{ème} phase :

Dans cette phase, les positions candidates au déploiement de nouveaux capteurs sont évaluées. Elle se déroule en deux étapes.

Dans l'étape de génération des positions candidates, la Triangulation de Delaunay est appliquée avec le reste des capteurs à déployer pour améliorer la couverture. Les positions candidates sont générées en tenant compte des positions des capteurs déjà en places. L'approche utilisée se base sur la construction incrémentale aléatoire de la Triangulation de Delaunay. Grâce à la propriété citée, il existe des cercles circonscrits des triangles ne contenant pas de capteurs. Les centres de ces cercles sont les positions candidates excepté les positions localisées autour des obstacles.

Dans la dernière étape, un mécanisme est appliqué pour permettre la sélection des futurs capteurs à déployer. Au début, une grille carrée est placée au centre des positions candidates. La longueur des bordures est prise $(SRange+PRange)*2$. Ceci permettra de considérer tous les points se trouvant aux alentours de la zone de surveillance. Le calcul du gain de couverture est estimé suivant le modèle de couverture proposé en sommant tous les taux de couvertures relatifs aux points de la grille. Chaque position étant évaluée, la position avec l'évaluation la plus grande fera l'objet de déploiement d'un capteur.

II.2.1.1 Critiques et discussions

- L'approche de Shen et al. [SCS06]

Les auteurs considèrent uniquement la couverture des centres des carrés au lieu du carré en entier, ce qui provoque des erreurs lors des calculs du taux de la k-couverture. Aussi, l'ajout de nouveaux capteurs influe

sur le taux de la k-couverture, ceci peut être expliqué par le fait que la granularité de la grille a un impact direct sur le taux de la k-couverture.

L'approche de redéploiement de nouveaux capteurs nécessite la connaissance au préalable des positions des capteurs, ce qui la rend inappropriée pour un réseau a grande échelle.

- **L'approche de Wang et Medidi [WM07]**

Contrairement a la triangulation standard, les auteurs construisent une triangulation approchée basée sur des informations du voisinage à un saut. Or, les informations sur la topologie peuvent perturber la construction de la Triangulation de Delaunay. La nature du déploiement aléatoire et le caractère variable des capteurs fait qu'avec la triangulation de Delaunay la distance idéale entre deux capteurs adjacents peut ne pas exister.

L'inconvénient majeur aussi est la défaillance précoce des capteurs qui meurent rapidement avec le temps à cause de la grandeur des rayons de capture qui fait que des calculs sophistiqués sont nécessaires au traitement du signal et le filtrage provoquant une consommation excessive de l'énergie. Ajouté a cela, le calcul et l'ajustement du rayon de capture seront perturbés du moment qu'il se base uniquement sur les voisins a un saut.

Récemment, **Vu et Li [VL09]** ont apporté des améliorations à la construction de la Triangulation de Delaunay qui permettent d'atteindre un taux de couverture total (100%).

- **L'approche de Wang et Medidi [WM08]**

Durant la construction de la maille virtuelle, le contrôle est effectué au niveau des cellules statiques (a posteriori) i.e par les maîtres des clusters au lieu de l'initiateur. Lorsque ce dernier effectue une diffusion vers les maîtres des clusters, des messages sont envoyés inutilement. L'idéal est que cette tâche soit effectuée par l'initiateur (a priori).

II.2.2 Couverture dynamique

La couverture dynamique est étroitement liée au caractère de mobilité du réseau de capteurs déployé. Dans la littérature, plusieurs travaux ont exploité la mobilité afin de maximiser la couverture ou d'améliorer les performances du réseau.

Une étude faite par **Du et Lin [DL05]**, portant sur l'amélioration des performances d'un réseau de capteurs sans fil a été effectuée par déploiement de capteurs mobiles. Les auteurs supposent un réseau composé

de N capteurs statiques et M capteurs mobiles fédérés par un capteur particulier nommé "puit".

Le principe est que chaque capteur statique transmet un paquet contenant ses coordonnées et celle d'un capteur mobile proche au capteur "puit" au bout d'un temps T qui suit le déploiement aléatoire. Une fois ce délai écoulé, le capteur puit se charge de construire la cartographie du réseau afin de localiser les endroits non couverts. Ces derniers sont trouvés grâce aux positions des capteurs statiques préalablement recueillis.

Deux approches exploitant le caractère de mobilité ont été avancées. La première concerne le placement des capteurs mobiles, dans laquelle le réseau est représenté sous forme d'une grille où les cellules sont de taille identique.

Une partie des capteurs mobiles λM ($0 < \lambda < 1$) est uniquement utilisée pour améliorer la couverture, les $(1-\lambda M)$ sont laissés pour soutenir le routage et la connectivité du réseau.

Le capteur "puit" est responsable du contrôle de la couverture de façon périodique en communiquant aux capteurs mobiles les endroits non couverts.

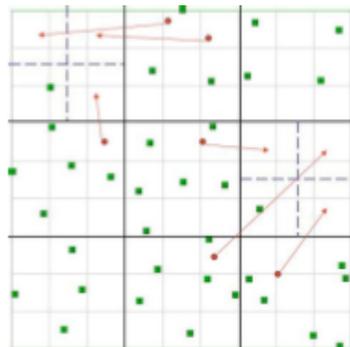


Figure II.30 : Placement des capteurs mobiles

Dans la deuxième approche, le capteur puit calcule les distances entre chaque capteur statique et leur voisins dans le diagramme de Voronoï (les voisins partageant la même arête). Les λM capteurs seront amenés à couvrir les endroits où il y a une longue distance entre deux capteurs voisins ou une petite distance entre un capteur et une arête de Voronoï. Le processus se répète jusqu'à ce que des λM capteurs soient placés.

Pour des considérations de connectivité et de routage, le rayon de communication est supposé deux fois plus grand que le rayon de capture.



- Capteur statique
- Capteur mobile

Figure II.31 : Mouvements des capteurs mobiles.

Heo et Varshney [HV03] se sont intéressés au problème du déploiement de capteurs mobiles. Ils ont étudié l'auto déploiement des capteurs mobiles sous la contrainte du temps et de l'énergie. Un algorithme distribué DSSA (Distributed Self Spreading Algorithm) a été proposé, visant à améliorer la topologie pour une meilleure longévité du réseau en faisant coopérer les capteurs mobiles entre eux.

Les auteurs se sont inspirés du concept des forces issues de la loi de Colomb en physique ainsi que l'équilibre des molécules est employé pour avoir une couverture maximale et former un réseau uniformément distribué. Par analogie à la physique, les capteurs représentent les molécules. Chaque capteur exerce une force sur les capteurs de son voisinage et inversement.

Le voisinage d'un capteur étant défini par les capteurs qui sont à la portée de son rayon de communication, chaque capteur décide de sa nouvelle position suivant sa position courante et les forces des capteurs qui s'exercent sur lui. Des critères d'arrêts sont introduits pour stabiliser les oscillations des capteurs.

Les figures suivantes montrent la configuration des capteurs mobiles avant et après l'exécution de l'algorithme.

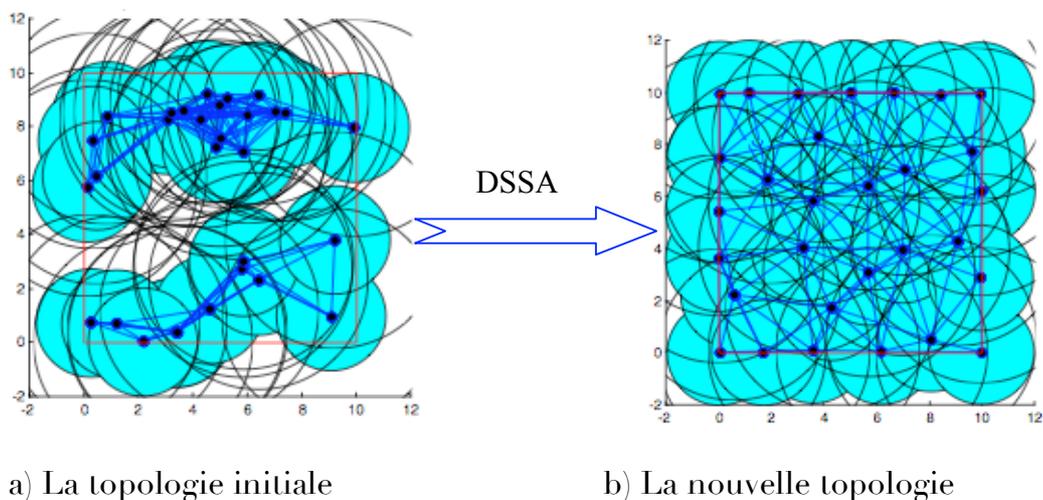


Figure II.32 : Configuration des capteurs mobiles

Les auteurs **Khelifa et al.** [KHMD09] ont traité le problème de la connectivité dans un réseaux de capteurs sans fil où la mobilité est considérée.

Ils ont proposé deux solutions traitant la surveillance et la maintenance de la connectivité du réseau.

Le réseau étant modélisé par un graphe, le premier algorithme proposé cherche les points d'articulation qui partitionnent le réseau. Après la détection des points d'articulation (PA), un deuxième algorithme active un capteur situé au voisinage de ceux-ci et s'il s'avère inexistant, il fait appel aux capteurs situés à un saut de ce point d'articulation.

Le choix d'un capteur parmi ceux qui sont trouvés s'opère en fonction de celui qui a le plus d'énergie. Ce dernier se déplacera pour être redondant de PA permettant ainsi d'augmenter la connectivité du réseau et de tolérer les défaillances en cas d'occurrences d'événements (attaque, épuisement d'énergie, etc.).

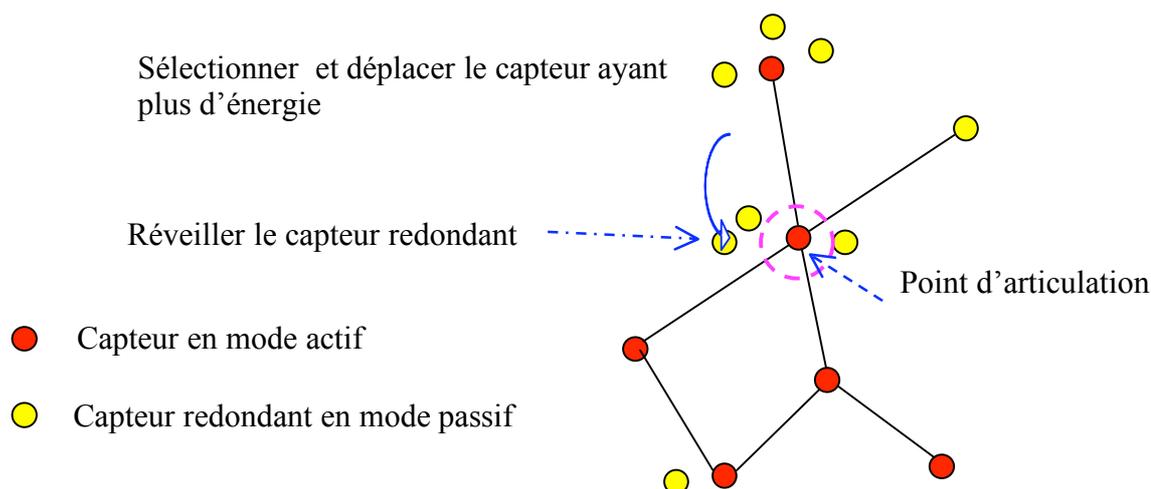


Figure II.33 : Auto organisation autour d'un point d'articulation

II.2.2.1 Critique et discussion

- **L'approche de Du et Lin** [DL05]

Contrairement à la première approche, le temps de calculs est fonction de la densité du réseau ce qui peut avoir un impact sur la prise de décision du capteur puit.

Le capteur puit est l'élément le plus vulnérable du réseau, il doit être sécurisé et mis à l'abri d'événements susceptibles d'altérer son fonctionnement.

- **L'approche de Heo et Varshney** [HV03]

Les auteurs n'ont pas considéré la maintenance de la connectivité durant le processus d'ajustement des positions. La densité est pratiquement nulle au niveau des frontières, ce qui rend cette approche vulnérable lors d'opérations comme le routage des données collectées vers les stations de bases.

- **L'approche de Khelifa et al.** [KHMD09]

La critique est que des points d'articulations peuvent ne pas avoir de voisins à un saut et d'après l'algorithme, aucune décision n'est prévu. Une amélioration serait d'augmenter l'espace de recherche à deux sauts par exemple et d'adapter la propriété du degré d'un nœud dans un graphe en la translatant aux points d'articulations. Cette propriété permettrait d'agir par priorité en déplaçant des capteurs mobiles en cas de détection de plusieurs points d'articulations sans voisins à un saut et dont le degré est important !

II.3 Tableau de synthèse des algorithmes de couvertures

Nous présentons dans ce tableau la classification des différentes approches discutées. Les deux tableaux suivant sont inspirés des critères de comparaison des deux travaux effectués par Cardei et Wu [CW05] et celui de Zhou [ZZSH12].

Tableau 2 : Tableau comparatif des approches étudiées.

Critères Approches	Stratégie de couverture	Rayon de capture	Métrique de couverture		Nature de l'Algorithme	Caractéristiques
			Taux de Couverture	Taux de la K- couverture		
DSSA [HV03]	Dynamique	Fixe	100%	Non évoqué	Distribué	Connaissance des positions requises
Du et Lin [DL05]	Dynamique	Variable	Plus de 97%	Non évoqué	Centralisé	- Utilisation d'un capteur puit - Connaissance des positions requises
[KHMD09]	Dynamique	Fixe	Non évoqué	2-couverture	Centralisé	Connaissance des positions requises
Wang et medidi [WM07]	Statique	Variable	Plus de 95%	Non évoqué	Localisé et distribué	Connaissance des positions requises
Grid Scan [SCS06]	Statique	Fixe	Plus de 90%	1-couverture= 15% 2-couverture= 25% 3-couverture= 20% 4-couverture= 30%	Centralisé	Connaissance des positions requises
Vu et Li [VL09]	Statique	Variable	100%	Non évoqué	Distribué	Connaissance des positions requises
Wu et autres [WLC07]	Statique	Fixe	100%	Non évoqué	Centralisé	Présence d'obstacles
Mesh-based [WM08]	Statique	Fixe	100%	Non évoqué	Distribué et localisé	Connaissance des positions requises
K coverage rate [SCC08]	Statique	Fixe	Non évoqué	2-couverture = 70% 3-couverture et 4- couverture <50%	Centralisé	Positions des capteurs non requises
[CWT04]	Statique	Fixe	Non évoqué	Non évoqué	Distribué et centralisé	Positions des capteurs requises
Voronoi et algorithme génétique [RNRH11]	Statique	Fixe	95,5%	Non évoqué	Centralisé	Connaissance des positions requises

Critères Approches	Connectivité et relation entre le rayon de couverture R_c avec le rayon de surveillance R_s	Objectifs	Nature du déploiement	Modèle de détection
DSSA [HV03]	Oui avec $R_c=2*R_s$	Auto déploiement, distribution uniforme des capteurs	Aléatoire	Non évoqué
Du et Lin [DL05]	Oui avec $R_c=2*R_s$	Amélioration des performances du réseau en termes de couverture et de connectivité	Aléatoire et déterministe	Implicitement booléen
[KHMD09]	Oui avec $R_c=2*R_s$ 2-connectivité	Tolérance aux défaillances, surveillance et maintenance de la connectivité	Aléatoire	Implicitement booléen
Wang et Medidi [WM07]	Oui avec $R_c=2*R_s$	Couverture, connectivité et efficacité en énergie	Aléatoire	Implicitement booléen
Grid Scan [SCS06]	Non évoqué	Estimation du taux de la k- couverture avec des rayons de capture arbitraires et minimisation du nombre de capteurs	Aléatoire	Implicitement booléen
Vu et Li [VL09]	Non évoqué	Couverture complète et équilibrage d'énergie	Non évoqué	Implicitement booléen
Wu et autres [WLC07]	Non évoqué	Maximiser la couverture	Déterministe	Probabiliste
Mesh-based [WM08]	Oui avec $R_c=2*R_s$	Couverture efficace en énergie et équilibrage d'énergie	Aléatoire	Non évoqué
K coverage rate [SCC08]	Non évoqué	Évaluation du taux de la couverture et déploiement d'un nombre minimal de capteurs	Aléatoire	Implicitement booléen
[CWT04]	Non évoqué	Ordonnancement des capteurs et Couverture	Aléatoire	Implicitement booléen
Voronoi et algorithme génétique [RNRH11]	Non évoqué	Amélioration du taux de couverture, placement optimal des capteurs	Aléatoire et déterministe pour le redéploiement	Implicitement booléen

Lors de la classification de ces approches discutées, nous avons remarqué que certaines peuvent appartenir aux deux stratégie de couverture. À titre d'exemple [RNRH11].

II.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de voir les différentes approches proposées dans la littérature pour la résolution du problème de couverture et de connectivité. Dans ces derniers, la priorité est donnée à la couverture. Cet état de l'art nous a permis de les comparer et de les critiquer. Bien que plusieurs de ces approches paraissent prometteuses, il existe toujours certains défis qui persistent et nécessitent leur prise en considération par les algorithmes et les méthodes qui doivent être conçues, notamment la connectivité, la consommation énergétique, la tolérance aux défaillances, le passage à l'échelle (*scalability*) *etc.*

Dans le chapitre 3, nous allons présenter notre contribution qui s'inspire du problème de découpe en 2D qui se pose dans plusieurs secteurs industriels.

Chapitre 3

SPMC-WSN (A Strip Packing Method for Coverage in Wireless Sensor Networks) : Une approche pour la couverture dans les réseaux de capteurs sans fils.

III.1 Introduction

Il est primordial de maintenir la couverture avec un nombre réduit de capteurs afin de réduire la consommation d'énergie du réseau de capteurs. Par conséquent, la durée de vie du réseau sera allongée.

Dans le présent chapitre, nous présentons une solution pour le problème de couverture dans les réseaux de capteurs sans fils homogènes, nommé **SPMC-WSN** (A Strip Packing Method for Coverage in Wireless Sensor Networks). L'objectif était d'adapter un problème issu de la Recherche Opérationnelle : celui du problème de la découpe en vue de modéliser le problème de couverture.

La première partie de ce chapitre sera consacrée à la description détaillée de l'approche pour la couverture proposée. La seconde portera sur le problème des huit reines dont **SPMC-WSN** s'inspire pour l'ordonnancement.

III.2 Approche pour la couverture SPMC-WSN

SPMC-WSN (pour A Strip Packing Method for Coverage in Wireless Sensor Networks) est une solution originale au problème de couverture dans les réseaux de capteurs sans fils.

Plus exactement SPMC-WSN, un algorithme centralisé qui à pour but de préserver la couverture et minimiser le nombre de capteurs actifs.

L'algorithme SPMC-WSN proposé :

- 1) Modélise le problème de couverture comme étant un problème de découpe dont le principal but est de placer un certain nombre d'objets rectangulaires sur n'importe quelle bande de base (surface rectangulaire) en minimisant la hauteur.
- 2) Requier la connaissance des positions géographiques des capteurs sur la surface rectangulaire (zone d'intérêt).
- 3) S'inspire d'un problème très cité dans la littérature à savoir : le problème des huit reines.
- 4) Reprends le principe deux algorithmes : algorithme BL (Bottom Left) et l'algorithme par couche afin de garantir une meilleure longévité du réseau grâce au règles d'optimisations appliqués a l'algorithme d'ordonnement de SPMC-WSN.

III.2.1 Principe de SPMC-WSN

L'approche SPMC-WSN comporte deux phases principales : la phase de placement des capteurs et la phase de désignation d'un sous-ensemble de capteurs actifs qui va assurer la couverture complète de la zone d'intérêt.

Nous commençons par modéliser le placement des capteurs grâce au problème de découpe. L'objectif est de placer les capteurs conformément à la méthode de placement issu de l'algorithme SHF [MCE03] que nous allons détailler dans ce chapitre.

Une fois que tous les capteurs sont déployés sur la zone d'intérêt, nous procédons à la sélection d'un ensemble de capteurs actifs qui va couvrir complètement toute la zone d'intérêt tandis que les autres capteurs vont se mettre a l'état passif afin d'éviter le gaspillage d'énergie par soucis d'étendre la durée de vie du réseau.

La désignation d'un tel ensemble se base essentiellement sur quelques règles générales issues du problème des huit reines.

III.2.2 hypothèses de travail

À présent nous énumérons, les différentes hypothèses sur lesquelles repose notre travail. Elles concernent essentiellement le mode de déploiement et le type du réseau considéré.

III.2.2.1 Déploiement des capteurs

Dans le chapitre I, différents modes de déploiement sont évoqués. Le déploiement déterministe est souvent employé lorsque l'environnement est connu, accessible et non sensible. Les capteurs peuvent alors être déployés en des endroits précis de la zone d'intérêt.

Notre travail emploie le déploiement déterministe des capteurs. Les capteurs sont statiques et ont des positions distinctes sur la zone d'intérêt.

III.2.2.2 Type du réseau

Les capteurs déployés sont homogènes dans la mesure où ils ont des rayons de surveillance et de communication identiques.

III.3 Description de SPMC -WSN

Cette section est consacrée à la description détaillée de SPMC-WSN, la relation entre le problème de découpe guillotine en 2D avec le déploiement déterministe des capteurs et les règles d'optimisations issues du problème des huit reines.

III.3.1 Problème de découpe

Les problèmes de découpe (cutting) et d'emballage (packing) sont souvent rencontrés dans le milieu industriel incluant différentes contraintes et objectifs. Ce genre de problème se pose principalement dans les secteurs qui impliquent la découpe du papier, du verre, du textile, etc. où un certain nombre de pièces sont placées sur un container (souvent une surface ou une bande de base).

Ce container possède une largeur fixe et une hauteur variable. L'objectif, dans la mesure du possible, est de placer toutes les pièces dans le container sans chevauchement, ceci en utilisant une hauteur minimale du container.

Le contexte de la découpe impose dans certains cas que toutes les pièces soient obtenues grâce à une séquence de coupe guillotine. Cette contrainte guillotine est imposée par les caractéristiques des machines automatiques de découpe. De plus la rotation des pièces est interdite. [MCE03].

La découpe et l'emballlement sont des problèmes d'optimisations qui concernent la recherche de bons arrangements des multiples pièces dans le container en respectant certaines contraintes et objectifs. Ces problèmes font partie de la classe des problèmes NP-Difficile pour lesquels il est difficile de trouver une solution optimale.

III.3.1.1 Formulation mathématique du problème de découpe

Le problème de découpe (strip packing problem) consiste à placer l'ensemble Ω composé de n objets (rectangles) sur une surface rectangulaire de largeur fixe W sans que les objets se chevauchent, de telle sorte que la hauteur H de la surface de découpe soit minimisée.

Chaque objet i a une dimension H_i et W_i , $i = 1, \dots, n$. La position d'un objet sur la surface rectangulaire est identifiée par ses coordonnées cartésiennes de leurs coins inférieur gauche x_i et y_i . Ce modèle de découpe en 2D peut être formulé par le programme linéaire suivant :

Min H

Sujet à :

$$x_i + w_i \leq W, i \text{ dans } \Omega$$

$$y_i + h_i \leq H, i \text{ dans } \Omega$$

$$x_i + y_i \leq x_j \text{ ou } x_j + y_j \leq x_i$$

Ou

$$\forall (i,j) \text{ dans } \Omega, i \neq j$$

$$y_i + h_i \leq y_j \text{ ou } y_j + h_j \leq y_i$$

$$x_i + y_i \geq 0, i \text{ dans } \Omega$$

- **Relation entre le problème de couverture et celui de la découpe**

Le problème de découpe consiste en :

- Un ensemble de pièces rectangulaires chacune définie par sa largeur w_i et sa hauteur h_i .
- Une surface rectangulaire (une bande de base) de largeur W et de hauteur H supposée infinie.

Par analogie aux réseaux de capteurs sans fil et en tenant compte des hypothèses de travail, les capteurs sont placés au niveau des centres de chaque objet rectangulaire, ainsi les objets représentent les capteurs et la surface rectangulaire (bande de base) représente la zone d'intérêt.

Le placement de ces pièces donne lieu, à la fin de la procédure, à une surface de dimensions $[N \times M]$ grâce à l'heuristique SHF dont N et M représentent respectivement le nombre d'objets en ligne et en colonne.

Dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil, la découpe est virtuelle. C'est seulement le principe de la procédure de placement et les contraintes satisfaites qui sont retenues et prises en considération.

Donc, la résolution du problème de découpe confère une solution au problème de couverture dans les réseaux de capteurs sans fils.

III.3.2 Modélisation de la couverture par le problème de la découpe

Dans l'approche SPMC-WSN, la première étape consiste à ramener la zone d'intérêt dans une bande de base pouvant la contenir, puis procéder au placement des capteurs selon l'heuristique SHF. La figure ci-dessous illustre comment obtenir la bande de base à traiter [SS11].

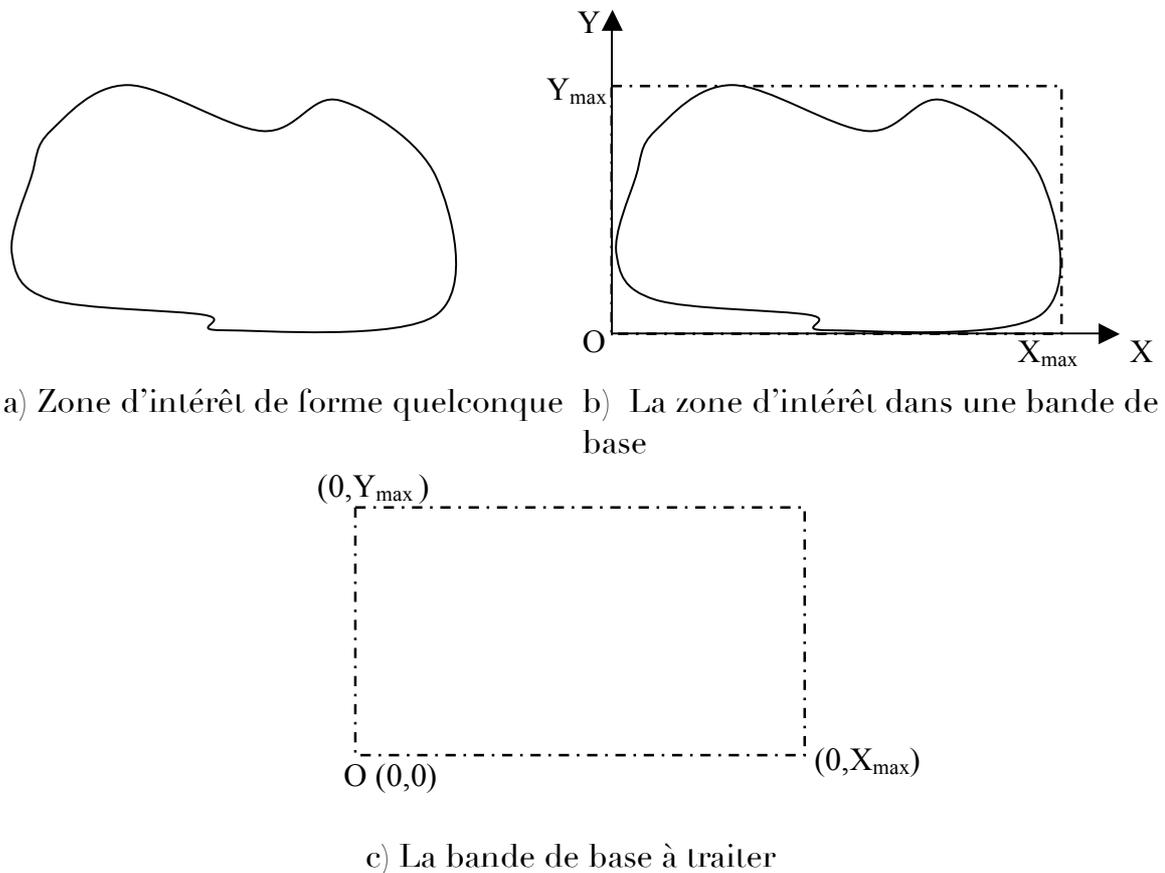


Figure III.34 : Représentation de la zone d'intérêt.

Notre approche pour la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil emploie l'heuristique SHF (Shelf Heuristic Filling). Nous allons dans ce qui suit, présenter l'heuristique SHF [MCE03].

L'objectif de l'heuristique SHF est de résoudre le problème de découpe en plaçant les pièces à chaque itération sur la bande de base tout en respectant la contrainte guillotine. Cette heuristique combine deux

algorithmes très cités dans la littérature : Bottom Left et algorithme par couche.

III.3.2.1 Présentation de l'heuristique SHF

Dans SPMC-WSN, le positionnement des objets au niveau de la bande de base est régi par l'heuristique SHF. Cette heuristique consiste à placer tous les objets sur la surface rectangulaire (bande de base) en tenant compte de la contrainte guillotine qui permet de réduire considérablement les chutes contrairement à l'algorithme BL et l'algorithme par couche.

- **Algorithme Bottom Left (BL) :**

L'algorithme de placement BL est une stratégie de placement très citée dans la littérature pour le placement des objets rectangulaires sur une bande de base. Avant de placer les objets, l'algorithme BL commence par ordonner les objets selon une liste de priorité. L'algorithme BL place un objet sur un endroit le plus bas et le plus à gauche possible dans la bande de base. Aucun traitement n'est effectué avant le placement des objets, les objets sont placés tel qu'ils sont sans aucun ordre. Néanmoins, cette stratégie ne génère pas une configuration guillotine i.e le placement final des objets rectangulaires ne respecte pas la contrainte guillotine et génère plus de chutes lors du processus de découpe.

L'heuristique SHF reprend l'algorithme BL et l'algorithme par couche en générant moins de chutes et surtout exploite les espaces vides.

Étant donné un certain nombre de rectangles de dimensions (x_i, y_i) quelconques et une bande de base de dimension (H, W) , il s'agit de placer les rectangles dans la bande de base de façon à ce que les rectangles soient placés le plus bas possible et le plus à gauche dont le côté de chaque objet est adjacent avec l'un des objets déjà en place.

La figure III.35 montre le placement de 7 objets rectangulaires sur une bande de base.

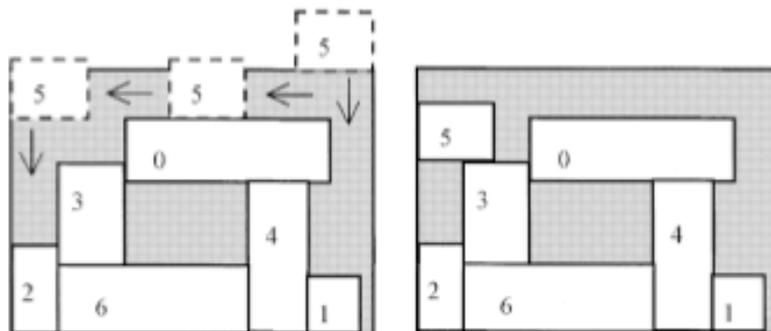
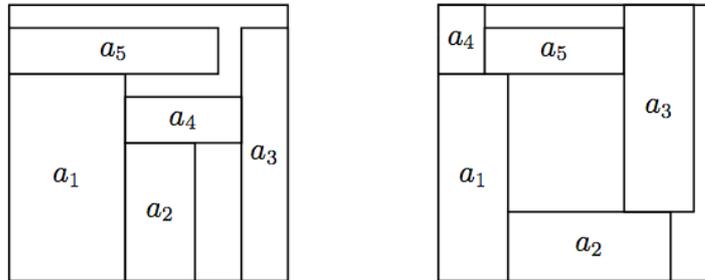


Figure III.35 : Principe de l'algorithme BL.

Dans les secteurs industriels de découpe, l'outil de découpe doit aller d'un bord à l'autre de la surface rectangulaire ou de la bande à découper. Ce type de découpe est appelé découpe guillotine ou découpe de bout à bout. Les algorithmes par couches permettent de résoudre ce genre de découpe.



(a) Contrainte guillotine respectée.

(b) Contrainte guillotine non respectée.

Figure III.36 : Illustration de la découpe guillotine

- Algorithme par couche

Étant donné un ensemble de pièces à placer, dans l'algorithme par couche, on procède au placement des pièces de gauche à droite en formant des couches.

La première pièce placée initialise la première couche dont le bas de celle-ci coïncide avec le bas de la bande de base. Le dessus de la couche suivante coïncide avec la hauteur de la pièce la plus haute se trouvant sur la couche précédente. Le principe consiste à placer chaque pièce en la justifiant à gauche sur la première couche où elle peut rentrer entièrement (BL est vérifiée). On répète ce processus jusqu'à ce que toutes les pièces soient placées.

L'algorithme par couche emploie plusieurs heuristiques cités dans la littérature : NFDH, FFDH, BFDH. Ces heuristiques forme une classe dans laquelle des prétraitements sont effectués. Chaque heuristique range les objets sur une liste selon l'ordre décroissant de la hauteur et seront une fois la phase de placement, justifiés a gauche dans la bande de base.

- 1) **Heuristique NFDH Next-Fit Decreasing Height:** dans cette heuristique, les objets sont placés en couche (niveau), et si un objet ne peut être pris par la couche courante une autre couche est initialisée juste au dessus du dessus de l'objet de la couche précédente. Ceci implique que le premier objet placé dans une couche détermine la hauteur de la couche suivante.

- 2) **Heuristique FFDH First-Fit Decreasing Height:** dans cette heuristique, les objets de hauteurs égales gardent leurs ordres d'origine chacun sur la liste. Un rectangle est placé sur la couche la plus basse dont l'espace qu'elle contient est suffisant pour le contenir. Elle cherche à partir de la couche du bas vers la couche supérieure l'espace suffisant pour contenir l'objet, et si les espaces existants ne sont pas suffisants, une nouvelle couche est créée juste en dessus de la couche la plus haute existante.
- 3) **Heuristique BFDH Best-Fit Decreasing Height :** cette heuristique est semblable à la précédente sauf que dans celle-ci les rectangles sont placés dans les couches ayant un espace horizontal résiduel minimal.

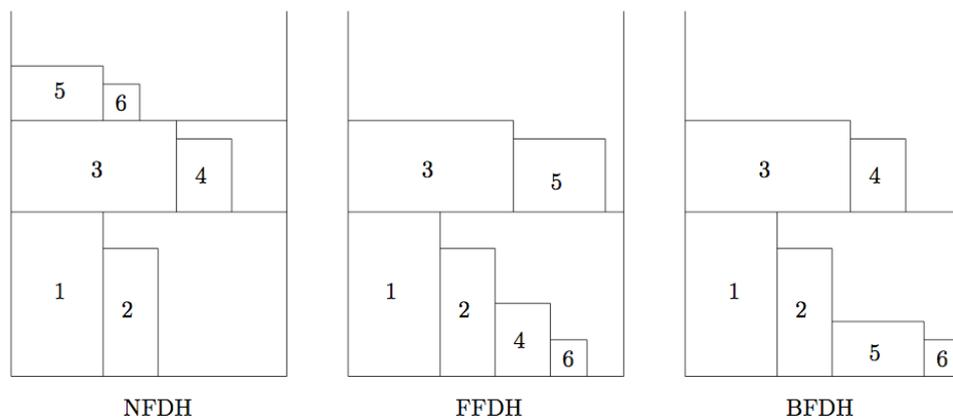


Figure III.37 : Algorithmes par couche

- **Remarque**

Si on observe bien la figure III.37, on remarque que les couches de niveau inférieures ne sont jamais revisitées i.e les espaces restants ne sont jamais exploités, cette problématique est surpassée par SHF.

III.3.2.2 Description de l'heuristique SHF

L'heuristique SHF emploie la notion de point disponible tout au long de l'algorithme qui correspond soit au coin inférieur droit soit au coin supérieur gauche d'une pièce déjà en place. À chaque point disponible, elle associe un rectangle disponible dont le coin inférieur gauche coïncide avec le point disponible et dont les dimensions sont à calculer à chaque itération de l'algorithme. Les dimensions sont calculées par la procédure *calcul_dimensions ()*.

Un rectangle disponible R de coin inférieur gauche (x, y) , de largeur w et de hauteur h sera représenté par le quadruplet (x,y,w,h) .

L'heuristique commence par ordonner les pièces selon l'ordre non croissant de la hauteur. Elle prend les pièces une par une et essaye de placer chacune d'elle dans la couche courante. Si elle rentre, elle passe à la pièce suivante, sinon avant d'initialiser une nouvelle couche, elle essaie de la placer dans le premier rectangle disponible qui peut la contenir.

L'algorithme fonctionne comme suit [MCE03]:

- État initial : un seul rectangle disponible $R=(0,0 W,H)$ qui correspond à la surface rectangulaire (zone d'intérêt) de largeur W et de hauteur H supposée infinie (non infinie dans notre contexte).
- État général : on dispose d'une liste que l'on appelle liste des rectangles disponibles notés R_1, R_2, \dots ordonnée selon *Trie_rectangles()* et l'on cherche à placer une nouvelle pièce (cellule) dans l'un des rectangles disponibles. À chaque fois qu'on décide de placer dans un rectangle disponible R_i^* , on supprime ce dernier et l'on génère deux rectangles dont on déterminera les dimensions avec la procédure *calcul_dimension()*. Ensuite, on met à jour la liste des rectangles disponibles (règle inclusion).

Et pour les autres rectangles $R_i, i \neq j$ on effectuera le traitement suivant :

- S'il existe un chevauchement entre le rectangle R_i et la surface occupée par la nouvelle pièce, alors on réduit les dimensions de ce rectangle, formellement $R_i = R_i \setminus R_i^*$.
- Sinon, R_i reste inchangé.
- S'il n'y a pas de chevauchement entre la surface occupée par la pièce et tous les rectangles disponibles alors, on réduit les dimensions de R_i^* .

- **Règle d'inclusion** [MCE03] : Si un rectangle récemment généré est entièrement contenu dans un rectangle déjà existant, alors on ne mémorise pas ce rectangle ni le point disponible associé.

L'intérêt de cette règle est d'éviter qu'un point disponible existant déjà puisse être associé à au nouveau rectangle généré i.e éviter les doublons.

Algorithme SHF

Début

1. $List_Rect_Disp = \{(0,0, W, H)\}$
2. Ordonner $list_pièces$ selon la procédure $Trie_pièces ()$
3. *Répéter*
 - 3.1 Placer la première pièce dans le premier rectangle disponible qui peut la contenir
 - 3.2 Mettre à jour la $list_pièces$ (supprimer la pièce récemment placée).
 - 3.3 Mettre à jour la $List_Rect_Disp$ avec la procédure $calcul_dimension ()$ et la *règle inclusion*.
 - 3.4 Insérer les deux rectangles récemment générés dans $List_Rect_Disp$ (déjà triée selon la procédure $Trie_Rectangle ()$).
 - 3.5 Passer à la pièce suivante.

Jusqu'à $list_pièces =$ vide

Fin

À présent, nous allons détailler les procédures utilisées dans SHF :

Procédure $Calcul_dimension ()$:

Soit $R_i = (x_i, y_i, w_i, h_i)$ le premier rectangle qui peut contenir la nouvelle pièce p de largeur w et de hauteur h . Nous allons nous intéresser au traitement de rectangle R_i et aux modifications apportées après le placement de la pièce p , et plus particulièrement au calcul des dimensions des deux rectangles générés.

On suppose que la pièce p est placée dans le rectangle R_i , et par conséquent deux nouveaux rectangles, que nous notons R_D et R_H sont générés.

La pièce est située de telle façon que le coin bas gauche de la pièce coïncide avec le coin bas gauche de R_i .

R_D sera le rectangle disponible défini par le coin inférieur gauche $(x_i + w, y_i)$ et par sa largeur $w_i - w$ et sa hauteur h_i , soit $R_D = (x_i + w, y_i, w_i - w, h_i)$.

R_H sera le rectangle disponible défini par le coin inférieur gauche $(x_i, y_i + h)$ et par sa largeur w_i et sa hauteur $h_i - h$, soit $R_H = (x_i, y_i + h, w_i, h_i - h)$.

Et pour mettre à jour la liste des rectangles disponibles, nous devons par la suite supprimer R_i de la liste des rectangles disponibles $List_Rect_Disp$ et insérer les deux nouveaux rectangles R_D et R_H et appliquer la *règle inclusion*. Puis réordonner selon la procédure $Trie_Rectangles ()$.

Procédure *Trie_pièces* ():

Dans cette procédure, nous nous intéressons au tri des pièces. Chaque pièce i est notée par le couple (w_i, h_i) qui définit respectivement la largeur et la hauteur de la pièce. La procédure *Trie_pièces* c'est d'abord trier les pièces selon l'ordre non croissant de la hauteur, et en cas d'égalité sur la hauteur, trier selon l'ordre non croissant.

Procédure *Trie_Rectangles* ():

Dans cette procédure, nous nous intéressons au tri des rectangles disponibles. Chaque rectangle disponible i est représenté par le quadruplet (x_i, y_i, w_i, h_i) . La procédure *Trie_Rectangle* commence par trier les rectangles disponibles suivant l'ordre croissant des ordonnées et en cas d'égalité des ordonnées, trier selon l'ordre croissant des abscisses.

Messaoud et al. [MCE03], ont prouvé grâce à deux lemmes et un théorème que la solution obtenue grâce à SHF, au problème de découpe en 2D, respecte la contrainte guillotine.

- Exemple d'application

Soit une bande de base vide et 3 rectangles à placer en respectant l'algorithme BL et l'algorithme par couches, citées précédemment.

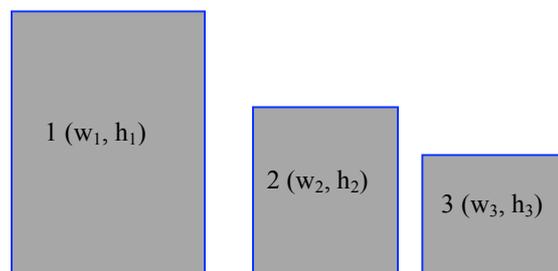


Figure III.38 : Liste de rectangles à placer

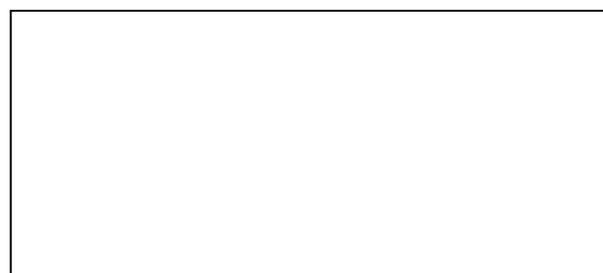


Figure III.39 : Bande de base vide

La figure III.40 montre le placement de 2 rectangles sur la bande de base par application de l'algorithme SHF selon le principe du point disponible.

Nous avons deux rectangles disponibles associés aux points disponibles $P1=(w_1+w_2,0)$ et $P2=(w_1,h_2)$ sont $R_1=(w_1+w_2, 0, W-(w_1+w_2),H)$, $R_2=(w_1, h_1, W-w_1,H-h_1)$.

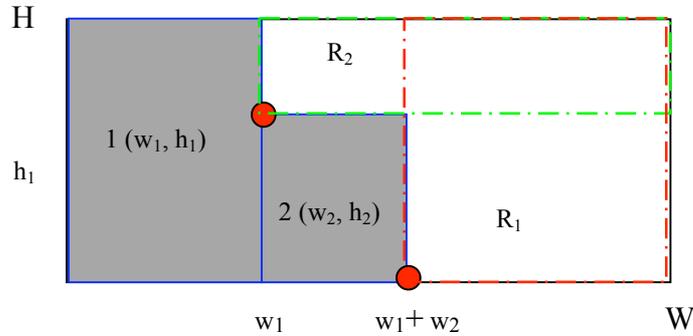


Figure III.40 : Avant le placement du rectangle 3

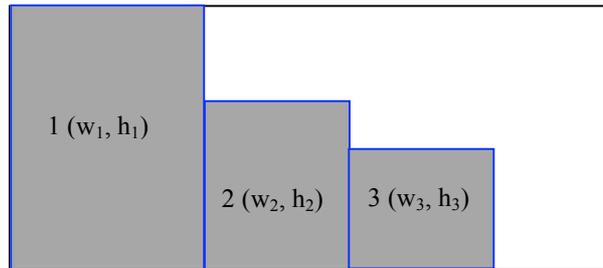


Figure III.41 : Après le placement du rectangle 3

III.3.3 Phase de placement dans SPMC-WSN

Supposant que nous avons déjà ramené une zone d'intérêt dans une bande de base de dimensions $(W \times H)$ vide telle que H représente la hauteur et W représente la largeur. Nous allons illustrer le placement de 20 capteurs selon l'heuristique précédente en tenant compte de l'hypothèse concernant le type du réseau.

Au départ nous disposons uniquement d'un seul rectangle disponible (état initial de l'heuristique) qui est la bande de base (zone d'intérêt) (figure III.42).

Nous plaçons le premier capteur dans la bande de base vide sur le premier rectangle disponible (figure III.43) suivant le principe de l'algorithme BL.

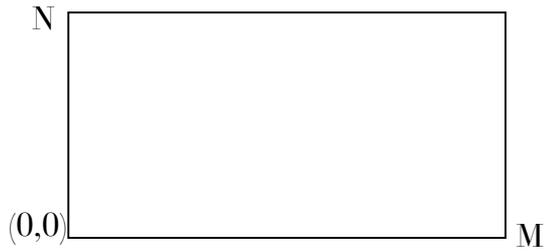


Figure III.42 : Bande de base vide.

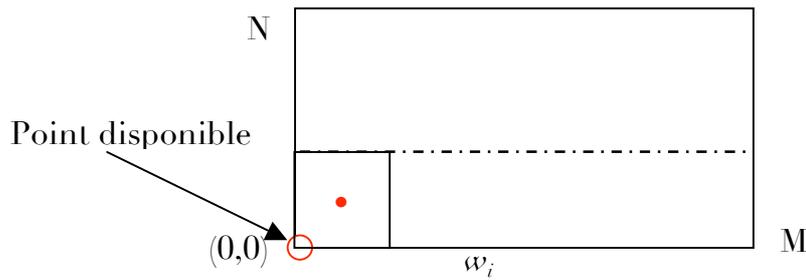


Figure III.43 : Placement du premier capteur

Comme la montre la figure III.43 le capteur est placé au niveau du rectangle disponible $(0,0, N, M)$.

Nous procédons à la mise à jour de la liste des capteurs et la liste des rectangles disponibles.

On remarque après placement du premier capteur et d'après la liste des rectangles disponibles que le nouveau point disponible a comme coordonnées $(w_i, 0)$ à partir du centre $(0,0)$.

Nous passons au placement du second capteur au niveau du point disponible ayant les coordonnées $(w_i, 0)$.

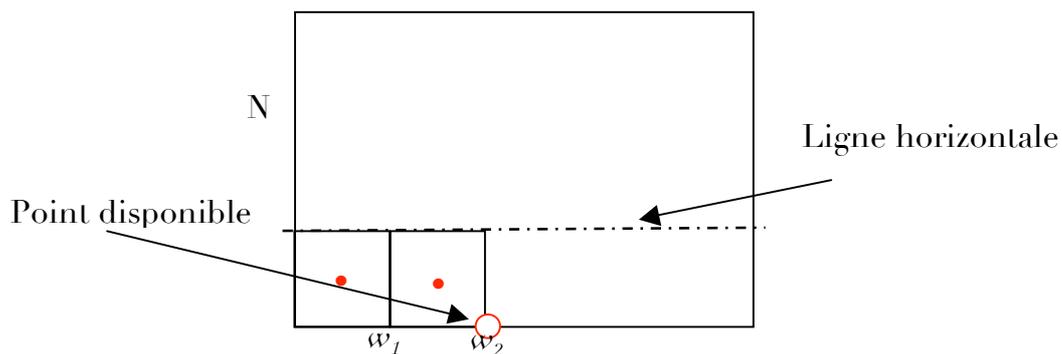


Figure III.44 : Placement du second capteur

Nous répétons le processus de placement jusqu'à ce que le bas de la première couche soit occupé par les capteurs. Puis, nous procédons de la même manière au niveau de la couche supérieure formée par la ligne horizontale qui coïncide avec la pièce la plus haute de la couche précédente

jusqu'à ce que toute la bande de base soit occupée par les capteurs i.e couverte.

À la fin du placement de tous les capteurs, nous obtenons la bande de base suivante de dimensions $[N \times M]$ où chaque capteur est situé au centre d'un rectangle. La superficie du rectangle est calculée suivant la formule présentée dans la section suivante.

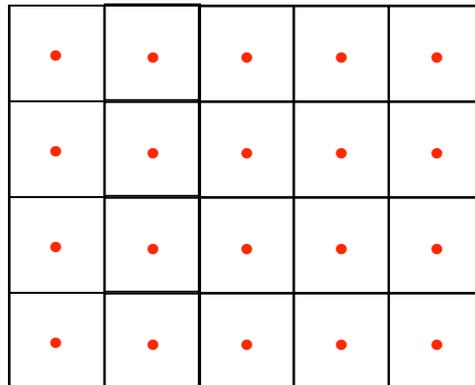


Figure III.45 : Bande de base après placement des capteurs

III.4 Problème des huit reines

Le problème des huit reines consiste à placer 8 reines sur un échiquier de telle façon qu'il y ait une seule reine par colonne, par ligne et par diagonale [web2], afin qu'aucune d'elle ne puisse menacer une autre [SS11].

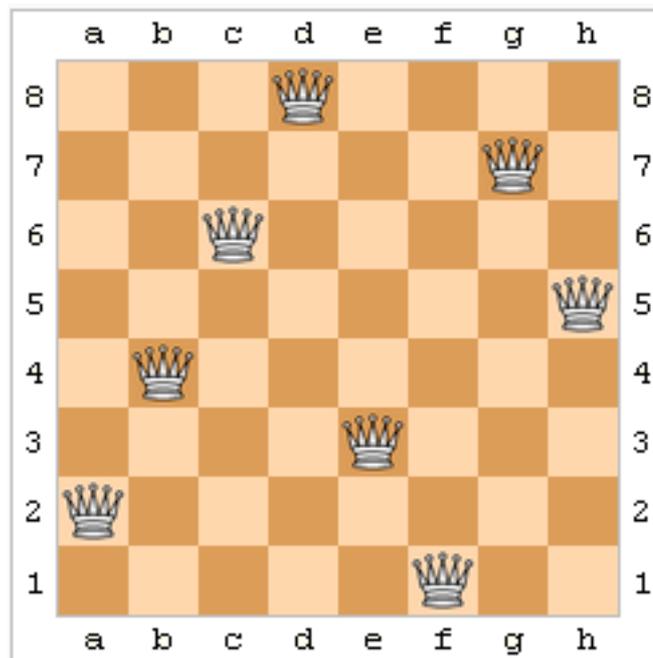


Figure III.46 : Placement de huit reines sur un échiquier

- **Relation entre le problème des reines et celui de couverture**

Intuitivement et par analogie au problème de couverture, on représente la bande de base contenant la zone d'intérêt obtenue précédemment par l'échiquier et les capteurs actifs par les reines.

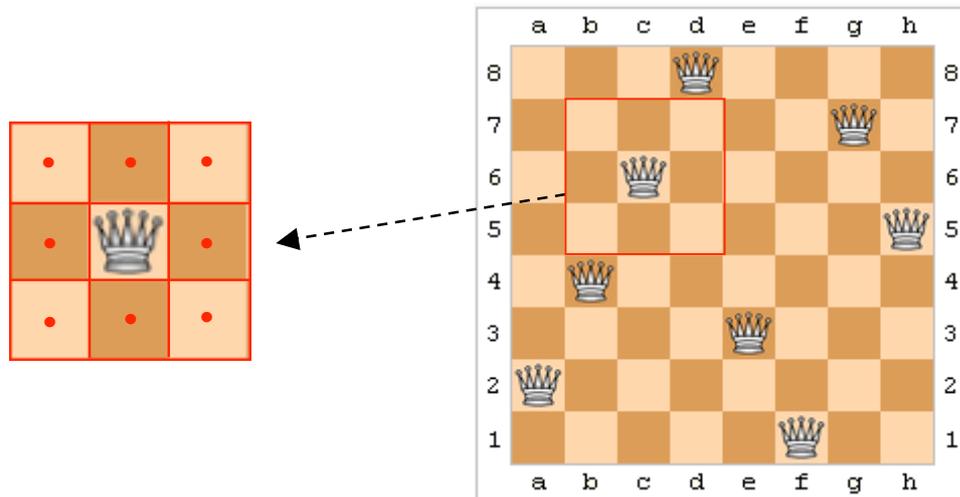


Figure III.47 : Relation entre le problème des huit reines et SPMC-WSN

Nous sommes basés sur le même principe pour optimiser le nombre de capteurs actifs. En effet, sur un rectangle container de base, un seul capteur se charge de couvrir toute la surface occupée par les capteurs voisins a un saut ; par ligne, par colonne et par diagonale avec un rayon de capture permettant de les dominer. Ainsi nous pouvons assurer la couverture des huit rectangles (capteurs) par une seule reine (capteur actif).

- **Définitions de base**

Nous énumérons ci-dessous quelques définitions différentes de [SS11] qui seront exploitées dans la désignation d'un sous-ensemble de capteurs actifs dans SPMC-WSN.

- 1) **Rectangle container** : est un rectangle pouvant contenir un certain nombre de rectangles.
- 2) **Rectangle container de base** : est un rectangle contenant 3 x 3 rectangles.
- 3) **Rectangles containers dépendants** : deux rectangles containers de base sont dits dépendants s'ils ont en commun un ou plusieurs rectangles.
- 4) **Rectangles containers indépendants** : deux rectangles containers de base sont dits indépendants s'ils n'ont aucun rectangle en commun.

- **Dimensions du rectangle container dans SPMC-WSN**

- 1) La dimension d'un rectangle x de la bande de base dépend du rayon de capture.
- 2) Chaque rectangle (capteur) ne peut couvrir que neuf rectangles (capteurs) i.e rectangle container de base de dimensions $[3 \times 3]$, et ne peut communiquer qu'avec ces huit voisins directs à un saut.

- **Relation entre le rayon de capture et le rectangle [SS11]**

Dans la modélisation par la découpe que nous avons adopté, le rectangle i.e le capteur est en relation directe avec le rayon de capture et par conséquent le rectangle container de base du fait que chaque capteur couvre neuf capteurs.

Nous employons le théorème de Pythagore pour établir la formule liant les dimensions de la cellule de base et le rayon de capture.

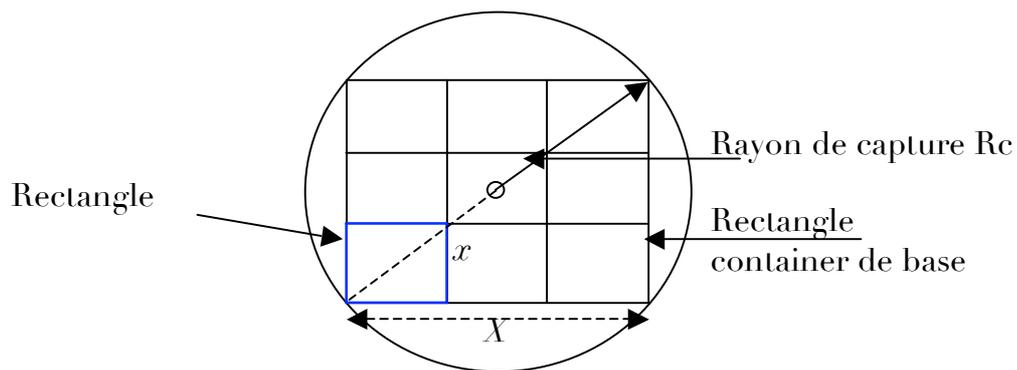
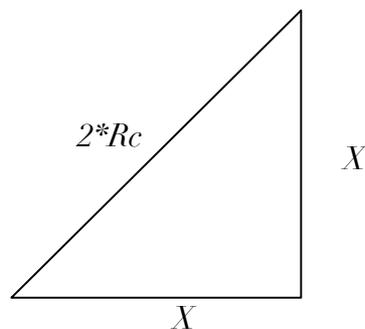


Figure III.48 : La relation entre le rayon de capture et la dimension du rectangle.

En appliquant le théorème de Pythagore sur le triangle formé par les dimensions du rectangle container de base et le rayon de capture, on obtient :



$$(2 * Rc)^2 = (X)^2 + (X)^2$$

$$4 * Rc^2 = 2 * X^2$$

$$X = Rc * \sqrt{2}$$

Comme nous travaillons avec un rectangle container de dimensions [3 x 3], la dimension du rectangle est $x = (Rc * \sqrt{2}) / 3$.

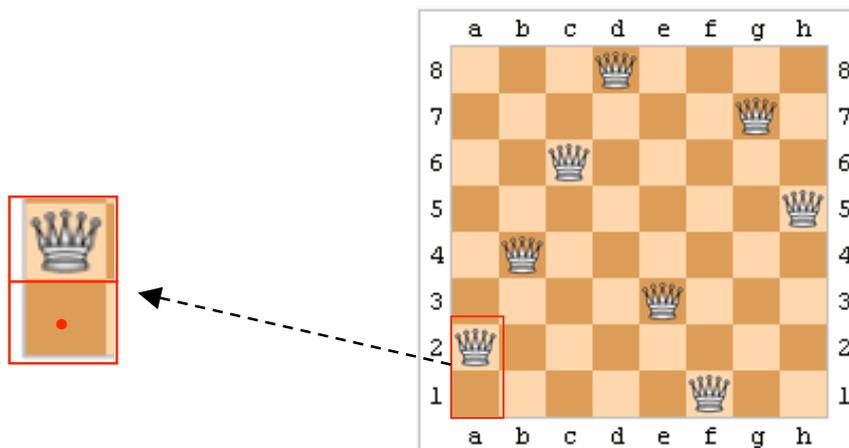
- **Règles de base pour l'ordonnement dans SPMC-WSN**

Nous allons maintenant présenter quelques règles d'optimisation pour la couverture dans notre approche SPMC-WSN. Ces règles vont nous permettre d'optimiser la consommation de l'énergie afin de maximiser la durée de vie du réseau. Ça consiste à ordonner l'activation des capteurs, en désignant un sous-ensemble de capteurs actifs couvrant toute la bande de base. Précisément, ces règles s'inspirent du problème des huit reines et celles qui sont présentées dans [SS11].

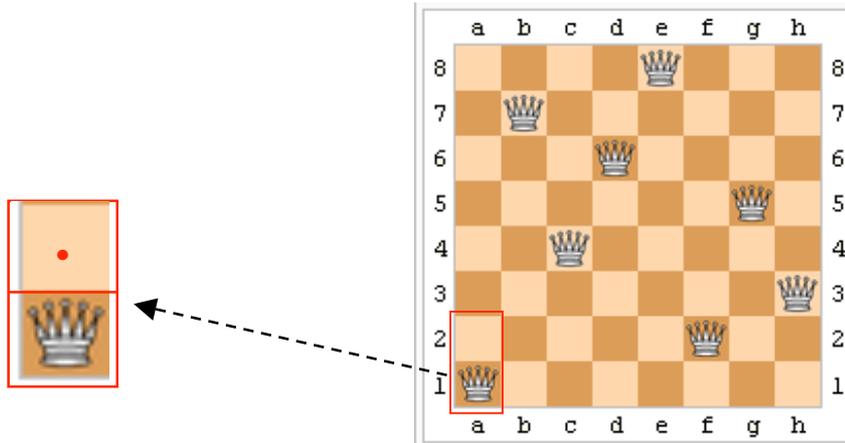
Le problème des huit reines possède 92 solutions dont 12 sont uniques. Nous sommes basées uniquement sur les solutions uniques. Les autres solutions peuvent être obtenus par permutations. Nous allons extraire à partir des différentes solutions uniques, dont nous allons présenter, les règles relatives à la désignation d'un sous-ensemble de capteurs actifs.

Règle de base 1 :

Dans cette règle, nous supposons qu'après placement, la bande de base se compose uniquement de deux rectangles (deux capteurs) i.e une bande de base de dimensions [2x1] ou [1x2]. Dans ce cas, un seul capteur doit être actif et l'autre passif. Dans la figure ci-dessous la reine représente le capteur actif et le point en rouge en bas représente le capteur passif.



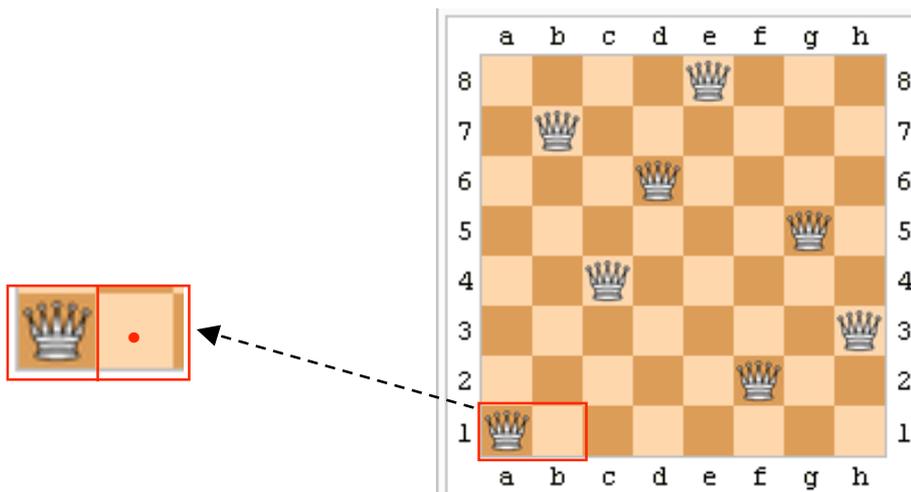
a) 1^{er} cas d'une bande de base de dimension [2 x 1]



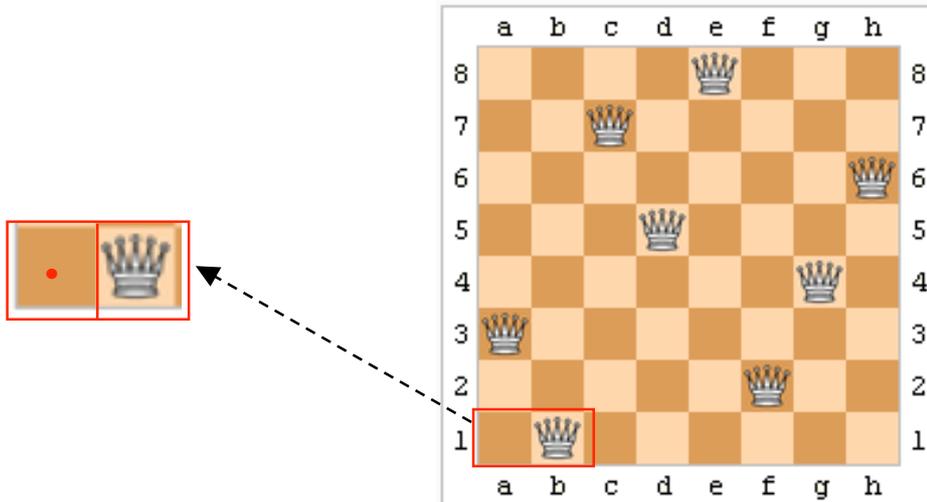
b) 2^e cas d'une bande de base de dimension [2 x 1]

Figure III.49 : Couverture d'une bande de base de dimension [2x1].

Nous allons procéder de la même façon pour déterminer le capteur actif dans le cas d'une bande de base de dimension [1 x 2].



a) 1^{er} cas d'une bande de base de dimension [1 x 2]



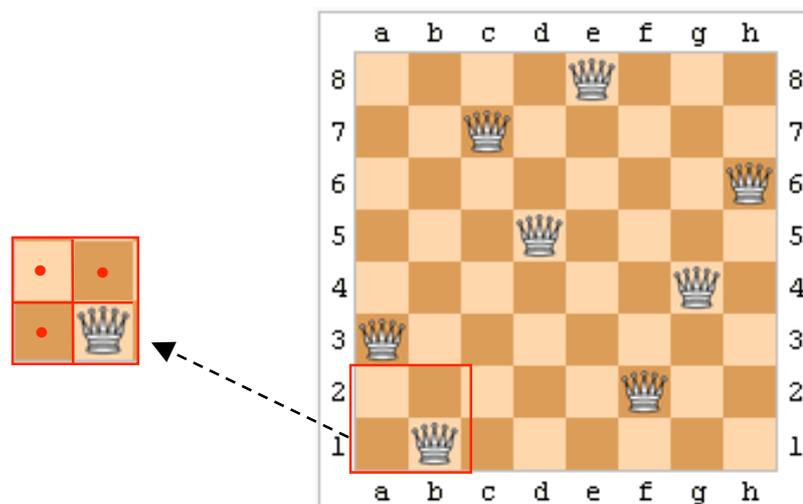
b) 2^e cas d'une bande de base de dimension [1 x 2]

Figure III.50 : couverture d'une bande de base de dimension [1x2]

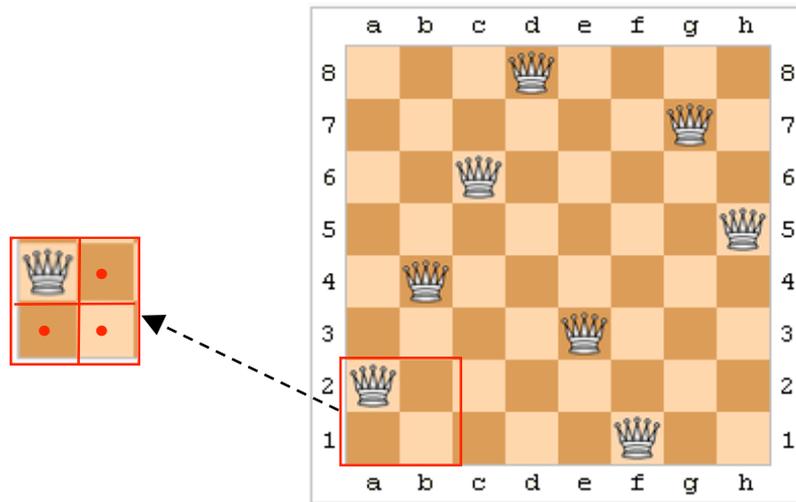
Afin d'éviter lequel des cas à choisir, dans notre algorithme SPMC-WSN nous procédons au choix aléatoire.

Règle de base 2 :

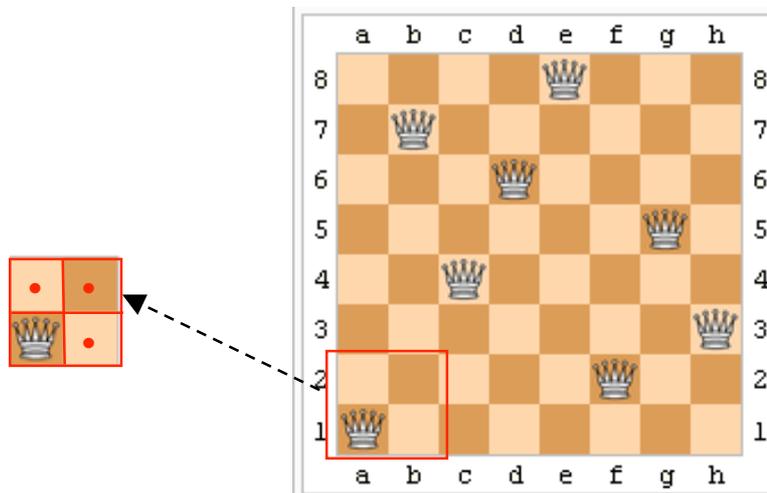
Dans cette règle, nous supposons qu'après placement, la bande de base se compose uniquement de quatre rectangles (4 capteurs) i.e une bande de base de dimensions [2x2]. Dans ce cas, un seul capteur doit être actif et les autres passifs. Dans la figure ci-dessous la reine représente le capteur actif et les trois points en rouge représentent les capteurs passifs.



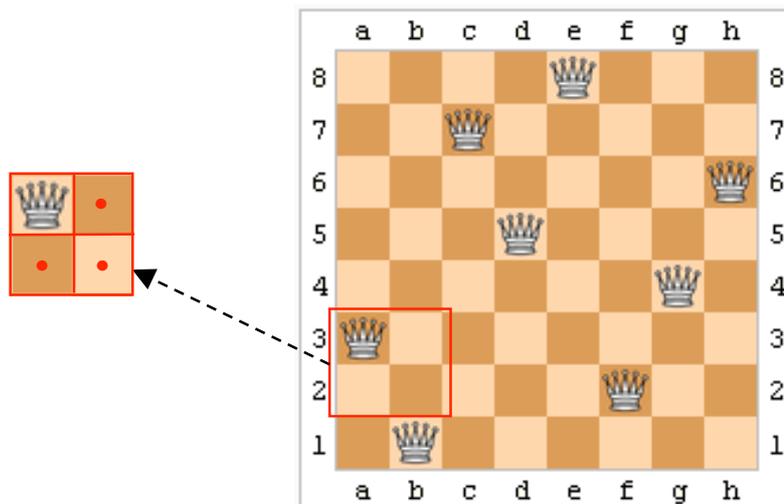
a) 1^{er} cas d'une bande de base de dimension [2x2]



b) 2^e cas d'une bande de base de dimension [2x2]



c) 3^e cas d'une bande de base de dimension [2x2]



d) 4^e cas d'une bande de base de dimension [2x2]

Figure III.51 : Couverture d'une bande de base de dimension [2x2]

Identiquement a la règle 1, nous procédons de façon aléatoire au choix du capteur qui va être actif, le reste des capteurs se met à l'état passif.

Règle de base 3 :

Cette règle illustre le principe de base de SPMC-WSN. En effet, dans le cas d'une bande de base composée de neuf rectangles i.e une bande de base de dimension $[3 \times 3]$, seul le capteur qui se trouve au centre va être mis à l'état actif, les autres capteurs seront couverts par celui du centre. De ce fait, les autres capteurs garderont le plus longtemps possibles leurs batteries.

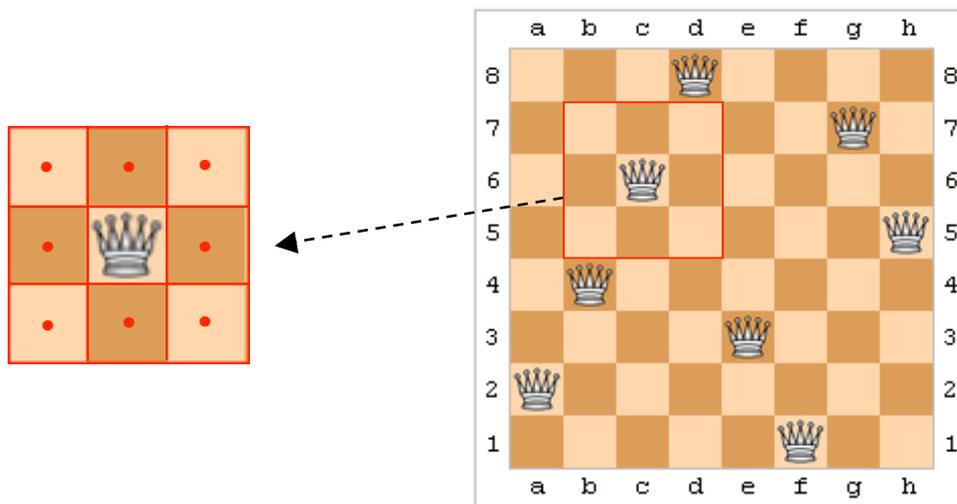
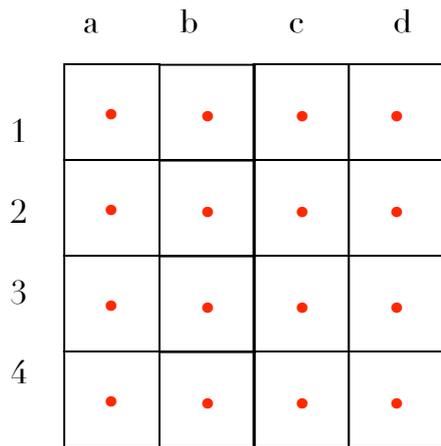


Figure III.52 : Principe de l'approche SPMC-WSN

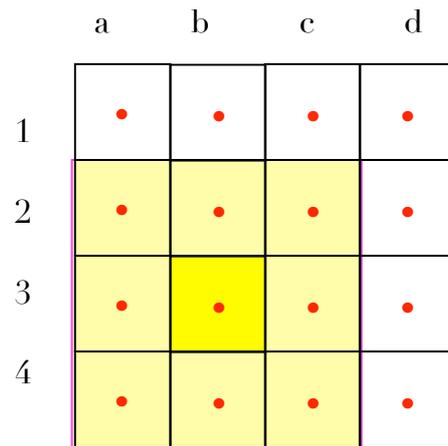
III.4.1 Principe d'optimisation dans SPMC-WSN

Nous allons illustrer le principe d'optimisation de notre algorithme SPMC-WSN par l'exemple d'une bande de base de dimension 4×4 :

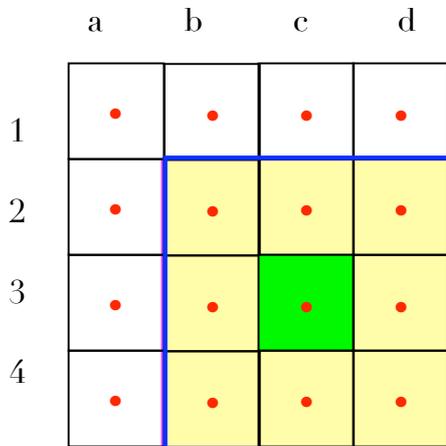
- On commence d'abord par chercher un rectangle container de base en respectant le principe de l'algorithme BL (Bottom Left). On désigne le premier capteur (3, b) comme étant actif.
- On localise après un autre rectangle container de base indépendant du premier en respectant la contrainte guillotine. En l'absence de celui-ci, on cherche un rectangle container de base dépendant d'un rectangle container indépendant ne contenant pas les rectangle restants en respectant le principe de l'algorithme BL. On désigne (3, c) comme deuxième capteur actif.
- Nous répétons les deux précédentes étapes jusqu'à ce que nous désignons tous les capteurs actifs couvrant tous les rectangles de la bande de base.



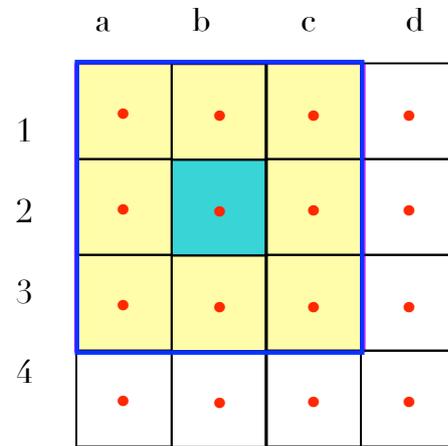
Configuration initiale



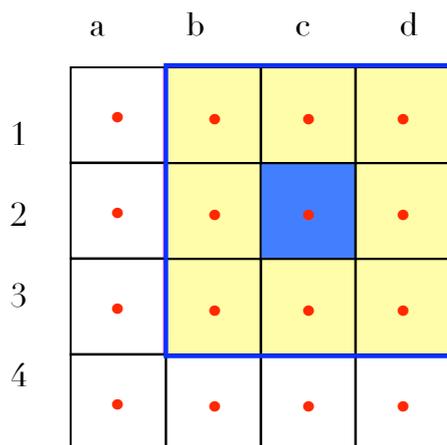
1^{er} rectangle container indépendant



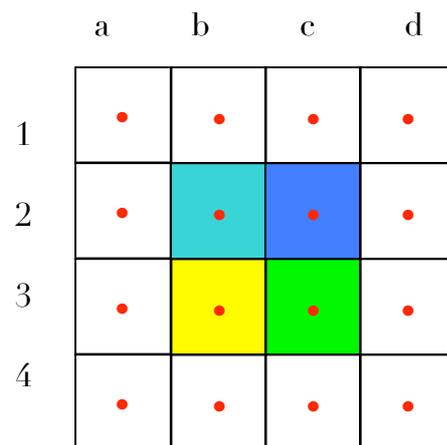
1^{er} rectangle container dépendant



2^e rectangle container dépendant



3^e rectangle container dépendant



Configuration finale

Figure III.53 : Couverture d'une bande de base $[4 \times 4]$ par 4 capteurs

Supposant maintenant que nous avons une bande de base de dimensions $[6 \times 6]$. Nous allons voir que 4 capteurs suffisent pour la couvrir sur un effectif de 36 capteurs. Nous allons suivre le principe d'optimisation élaboré en haut.

Dans ce cas, il s'agit de localiser les rectangles containers indépendants, on remarque que la bande de base de dimension $[6 \times 6]$ est multiple de la dimension $[3 \times 3]$, donc nous aurons 4 rectangles containers indépendants (colorés en bleu).

	a	b	c	d	e	f
1	•	•	•	•	•	•
2	•	•	•	•	•	•
3	•	•	•	•	•	•
4	•	•	•	•	•	•
5	•	•	•	•	•	•
6	•	•	•	•	•	•

Figure III.54 : Couverture d'une bande de base de dimension $[6 \times 6]$ par 4 capteurs

Remarques

- On peut très bien penser à utiliser les rectangles containers dont les dimensions sont inférieures à $[3 \times 3]$ pour pouvoir d'une part garantir la couverture et d'autre part, la connectivité entre les capteurs actifs. Néanmoins, dans ce cas, on aura à générer plusieurs capteurs actifs ! C'est pour cette raison que nous allons employer uniquement et seulement le rectangle container de base lors des règles d'optimisations.

- Un cas particulier est celui d'une bande de base de dimension $[2 \times 3]$ ou $[3 \times 2]$. Ces deux bandes de bases peuvent être vues comme étant des bandes de bases diminuées de 3 rectangles de manière horizontale ou verticale.

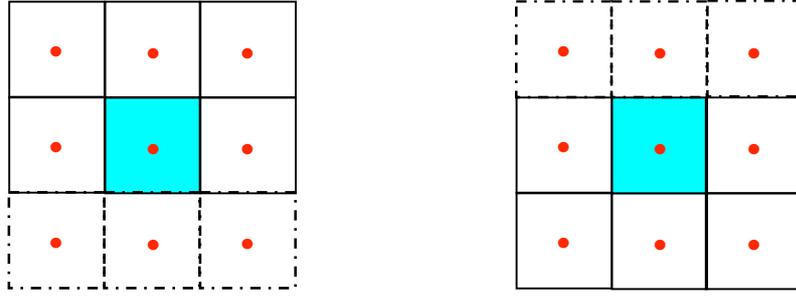


Figure III.55 : Bande base [2x3] diminuée de 3 rectangles

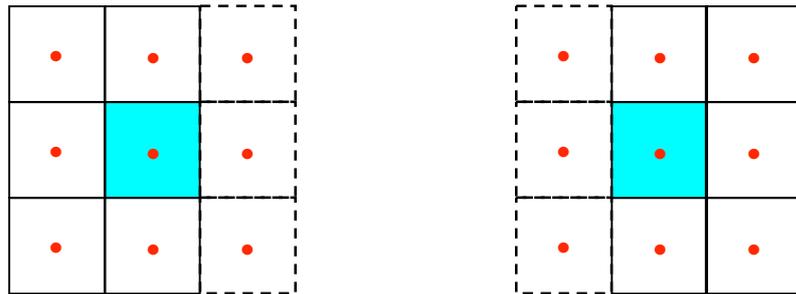


Figure III.56 : Bande de base [3x2] diminuée de 3 rectangles

Suite aux exemples pratiques présentés, nous pouvons énoncer les règles d'optimisations générales suivantes :

Règle d'optimisation 1

Dans le cas d'une bande de base de dimension [NxM] tel que N et M sont multiples de 3 alors localiser les rectangles containers indépendants selon le principe de l'**algorithme BL** et l'**algorithme par couche** en respectant la **contrainte guillotine** puis mettre les capteurs se trouvant aux centres de ces derniers à l'état actif.

Règle d'optimisation 2

Dans le cas d'une bande de base de dimension [NxM] tel que $N > 3$ et $M > 3$, où N et M sont quelconques alors localiser les rectangles containers dépendants des rectangles containers indépendants **ne contenant pas les rectangles restants** grâce au principe de l'**algorithme BL** et l'**algorithme par couche**. À la fin, mettre les capteurs se trouvant au centre de ces derniers à l'état actif.

III.4.2 Algorithme d'optimisation

L'algorithme d'optimisation suivant emploie les règles d'optimisations générales présentées dans la section précédente et traite tous les cas que nous avons présentés. Nous avons repris celui de [SS11] pour l'optimiser grâce à l'algorithme BL et par couches.

Algorithme SPMC-WSN

Entrée : Soit $G = [N \times M]$ la bande de base précédemment obtenue dans la première phase avec la méthode découpe SHF.

Début

1) *Cas particuliers*

1.1) **1er Cas** où $G = [a \times b]$ // $a, b \in \{1,2\}$ tel que $a \neq b$

1) $y = \text{random}(1,2)$ // générer un nombre aléatoire entier soit 1 ou 2.

2) **Si** ($a=1$) **alors**

Mettre à l'état actif le capteur $G[a, y]$.

Sinon

Mettre à l'état actif le capteur $G[y, b]$.

Finsi

1.2) **2e Cas** où $G = [2 \times 2]$

1) $x = \text{random}(1,2)$

2) $y = \text{random}(1,2)$

3) Mettre à l'état actif le capteur $G[x, y]$.

1.3) **3e Cas** où $G = [3 \times 3]$

1) Mettre à l'état actif le capteur $G[2,2]$.

1.4) **4e Cas** où $G = [a \times b]$ // $a, b \in \{2,3\}$ tel que $a \neq b$

1) $x = \text{random}(1,2)$

2) Mettre à l'état actif le capteur $G[x, 2]$

1.5) **5e Cas** où $G = [a \times b]$ // $a, b \in \{2,3\}$ tel que $a \neq b$.

1) $x = \text{random}(1,2)$

2) **Si** ($a=2$) **alors**

Mettre à l'état actif le capteur $G[x, a]$

Sinon

Mettre à l'état actif le capteur $G[a, x]$

Finsi

2) *Cas généraux*

2.1) **1er Cas** où $G = [a \times b]$ // $a, b \in \{2, 3k\}$ $a \neq b$, $k \geq 2$

1) Localiser les rectangles containers dépendants **RD** $[a \times b]$ des rectangles containers indépendants **ne contenant pas les rectangles restants** grâce au principe de l'**algorithme BL** et l'**algorithme par couche**.

2) Mettre à l'état actif les capteurs aux centres des rectangles containers obtenues précédemment.

2.2) **2e cas** où

Si $G = [a \times b]$ // $a, b \in \{3k\}$ $k > 1$.

1) Localiser les rectangles containers indépendants **RI** selon le principe de l'**algorithme BL** et l'**algorithme par couche**.

2) Mettre à l'état actif les capteurs aux centres des rectangles containers obtenues précédemment.

Sinon

- 3) Localiser les rectangles containers dépendants **RD** des rectangles indépendants ne contenant pas les rectangles restants grâce au principe de l'**algorithme BL et l'algorithme par couche**.
- 4) Mettre à l'état actif les capteurs aux centres des rectangles containers obtenues précédemment.

Fin

Sortie : Bande de base G ayant le minimum de capteurs qui la couvre totalement.

III.4.3 Exemples d'applications

Nous allons présenter quelques exemples d'applications de notre algorithme d'optimisation.

Soit une bande de base de dimension $[9 \times 9]$. D'après le principe de SPMC-WSN, il y a 9 rectangles containers indépendants, donc 9 capteurs actifs sur un total de 81 [SS11].

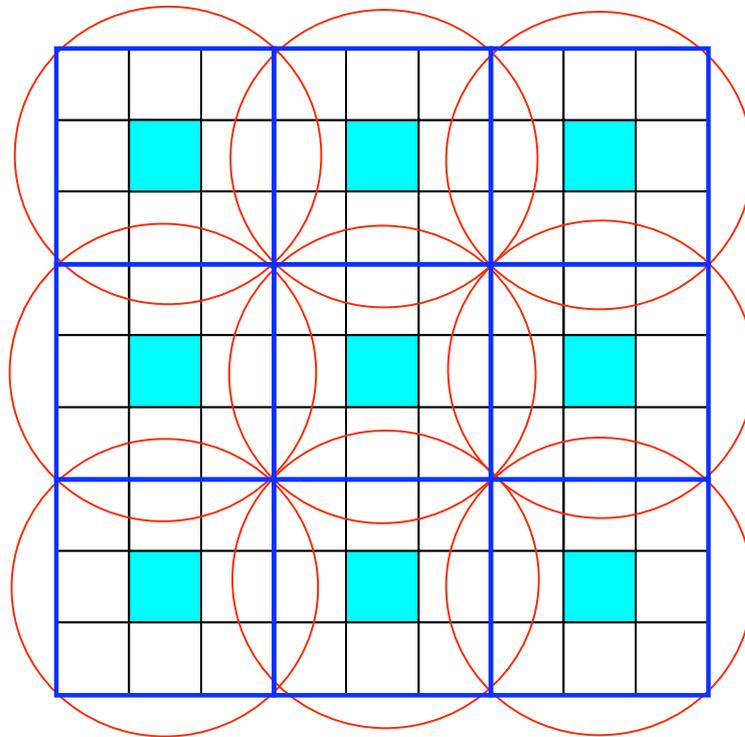


Figure III.57 : Bande de base de dimension $[9 \times 9]$.

Sur une bande de base de dimensions $[4 \times 9]$, nous avons 6 capteurs actifs sur un total de 36 capteurs [SS11].

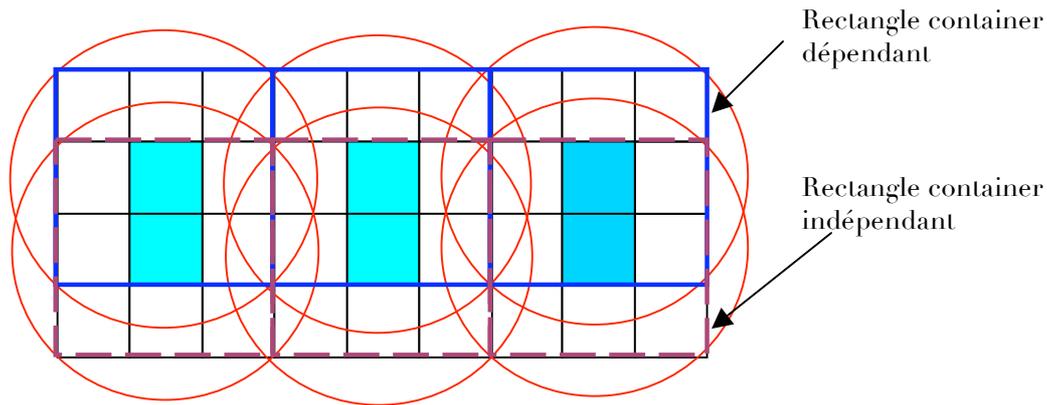


Figure III.58 : Bande de base de dimension $[4 \times 9]$.

III.4.4 Généralisation de SPMC-WSN

Dans le milieu industriel des technologies des capteurs sans fil, les capteurs possèdent chacun une portée de surveillance différente. Par rapport au principe de base de SPMC-WSN, si un capteur possède un rayon de surveillance qui dépasse le rectangle container de base alors ce capteur peut avoir plus de voisins, autrement dit il couvre plus de capteurs. L'utilisation des capteurs dont le rayon de capture est grand aura un impact significatif sur la réduction du nombre de capteurs actifs de la zone d'intérêt. Ce principe est la clé de la généralisation de SPMC-WSN à des rectangles containers de bases dont leurs dimensions sont supérieures à 3×3 .

Le fait de considérer uniquement un rectangle container de base, nous empêche de placer un nombre quelconque de rectangle sur la bande de base puisque le rectangle container est en étroite relation avec le rayon de capture i.e les rectangles de la bande de base diminuent avec l'augmentation du rayon de capture et vice-versa. La généralisation nous permet de surpasser cette contrainte. C'est de cela que découle cet intérêt pour la généralisation.

Dans [SS11], il s'agit de trouver la grille de base non pas suivant la valeur exacte du rayon de capture mais de façon approchée, en prenant la valeur du rayon de capture comme étant une puissance de 3. Or, faisant ainsi la grille de base résultante est incorrecte et par conséquent le nombre de capteurs dominés n'est pas exact aussi.

Dans notre algorithme généralisé, nous prenons la valeur exacte du rayon de capture pour le calcul de la dimension du rectangle container i.e le nombre de rectangles qu'il contient. La formule que nous utilisons est semblable à celle de [SS11].

III.4.4.1 Principe de généralisation de SPMC-WSN

Nous allons dans cette section voir comment généraliser SPMC-WSN. Par souci de simplification nous allons prendre la dimension d'un rectangle égale à $(1 \times 1) \text{ m}^2$. Bien évidemment, on peut penser à prendre une dimension $(d \times d) \text{ m}^2$.

La première phase de l'algorithme généralisé, consiste dans un premier temps à chercher le rectangle container de base à partir du rayon de surveillance des capteurs.

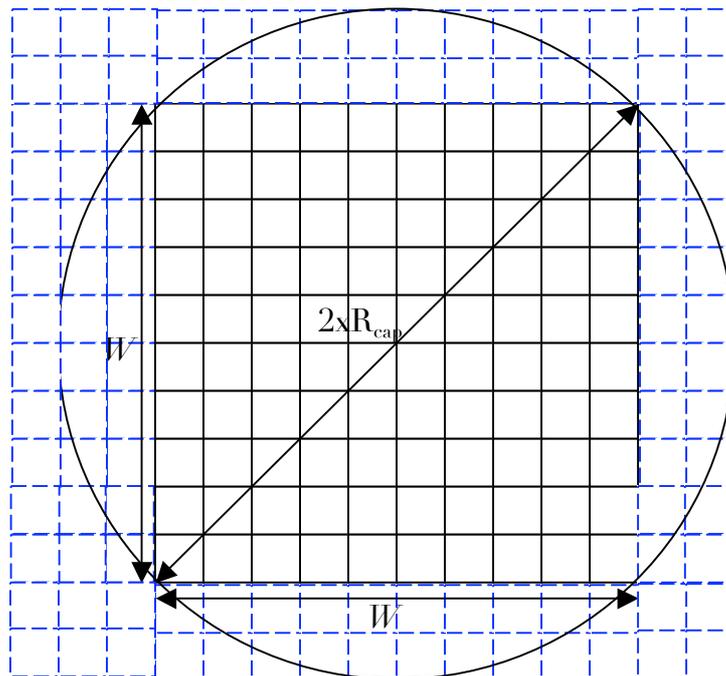


Figure III.59 : Relation généralisée entre le rayon de capture et le rectangle container de base.

À partir de cette figure et par application de la formule de Pythagore, on obtient $W = R_{cap} \times \sqrt{2}$. C'est à partir de cette relation que nous allons chercher la dimension du rectangle container de base. Par la suite, nous allons calculer le nombre de rectangles se trouvant dans un rectangle container de base comme suit :

- 1) On calcule $W = R_{cap} \times \sqrt{2}$.
- 2) On affecte la valeur entière de "W" à "k" et l'on pose $\Omega = k$, k étant le nombre de rectangle dans RCB.
- 3) Le rectangle container de base sera égale à $RCB = [\Omega \times \Omega]$.

Pour toute bande de base $[N \times M]$ contenant une zone d'intérêt, elle est composée de Δ rectangles containers de dimensions $[\Omega \times \Omega]$. dépendants et indépendants.

III.4.4.2 Algorithme de généralisation de SPMC-WSN

Entrée : Soit $G = [N \times M]$ la bande de base précédemment obtenue dans la première phase avec la **méthode découpe SHF**.

Début

- 1) Algorithme SHF. // Phase de placement des capteurs
- 2) // Calcul des dimensions du rectangle container de base
 - $W = R_{\text{cap}} \times \sqrt{2}$.
 - $k = [W]$. // partie entière de W
 - $RCB = [\Omega \times \Omega]$.

3) // Règles d'optimisations.

Pour $G = [N \times M]$ faire

Si $((N, M) \in \{k \times k'\})$ alors // k' entier positif multiple de k

- 1) Localiser les rectangles containers de bases $[\Omega \times \Omega]$ indépendants selon le principe de l'algorithme BL et l'algorithme par couches.
- 2) Mettre à l'état actif les capteurs se trouvant aux centres des rectangles containers $[\Omega \times \Omega]$.

Sinon

- 1) Localiser les rectangles containers de bases indépendants $[\Omega \times \Omega]$ grâce au principe de l'algorithme BL et l'algorithme par couches.
- 2) Localiser les rectangles containers de bases dépendants $[\Omega \times \Omega]$ des rectangles containers indépendants ne contenant pas les rectangles restants grâce au principe de l'algorithme BL et l'algorithme par couches.
- 3) Mettre à l'état actif les capteurs se trouvant aux centres des rectangles containers $[\Omega \times \Omega]$ obtenus dans 1) et 2).

Finsi

Fin pour

Fin

Sortie : Bande de base G ayant le minimum de capteurs qui la couvre.

III.5 Comparaison entre QGMC [SS11] et SPMC-WSN

Nous avons repris le travail de [SS11], que nous avons amélioré grâce à l'approche SHF. Ci-dessous un tableau comparatif de notre approche SPMC-WSN et l'approche QGMC [SS11].

Tableau 3 : Comparaison entre QGMC et SPMC-WSN

Critères	QGMC [SS11]	SPMC-WSN
Modélisation du problème de couverture	Absente	Modélisation par le problème de découpe
Recherche des capteurs actifs	Non optimisée et non exhaustive.	Optimisée grâce au principe de l'algorithme BL et par couche.
Choix des capteurs actifs selon la zone d'intérêt	Solutions alternatives et non exhaustives	Solution unique
Algorithme de base et généralisé sont corrects !?	Non, ne traitent pas certains cas particuliers	Oui
Ordonnancement	Génération d'un seul sous ensemble de capteurs actifs	Génération d'un seul sous ensemble de capteurs actifs
Couverture	Garantie	Garantie
Concepts introduits	Grille de base, grille de base dépendante et indépendante	Rectangle container, rectangle container dépendant et indépendant
Valeur du rayon de capture dans l'algorithme généralisé	Approchée	Exacte

III.6 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre SPMC-WSN, une approche pour la couverture dans les réseaux de capteurs sans fils homogènes. La solution proposée se base sur la combinaison de deux problèmes issus de la recherche opérationnelle : le problème de découpe en 2D appelé aussi *strip packing* et le problème des huit reines.

La validation par simulation de notre approche SPMC-WSN fera l'objet du chapitre suivant à travers des scénarios de simulations.

Chapitre 4

Simulation et évaluation des performances de l'approche SPMC-WSN (Strip Packing Method for Coverage in Wireless Sensor Networks)

IV.1 Introduction

Comme on a vu dans le troisième chapitre 3, SPMC-WSN est une approche modélisant le problème de couverture dans les réseaux de capteurs sans fil par celui de la découpe. Elle fournit un placement déterministe des capteurs. De plus, SPMC-WSN exploite la technique d'ordonnancement d'activité qui vise à prolonger la durée de vie du réseau.

Ce chapitre est composé de deux sections. Dans la première section, nous présentons les paramètres de simulations et paramètres de performances retenus lors de l'évaluation des performances de SPMC-WSN et qui est souvent le cas dans les solutions proposées.

Dans la deuxième section, nous présentons les résultats de simulations par rapport à certaines approches que nous avons pu obtenir jusqu'à ce jour.

IV.2 Environnement et paramètres de simulation

IV.2.1 Environnement de simulation

Suite à l'étude que nous avons effectué concernant un certain nombre de simulateurs existant (Ns-2, J-Sim, etc.) dédié a la simulation dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, nous avons constaté que des modifications auraient été nécessaires afin de les adapter à notre approche SPMC-WSN. Ajouté a cela, le temps requis pour la prise en main des simulateurs dépasse largement celui requis pour le développement d'un outil de simulation dédié. Pour ces raisons, nous avons choisi de réaliser notre propre outil de simulation dédié a SPMC-WSN.

Cet outil a été développé avec le langage Java sous l'environnement Eclipse Indigo version 3.7.2 . Toutes les simulations sont effectuées sous un ordinateur de type Apple (MacBook) ayant 2 Go de RAM équipé d'un processeur Intel Core 2 Duo cadencé a 2 GHz.

IV.2.2 Paramètres de simulation

Afin d'expérimenter notre approche, nous avons utilisé les paramètres suivants : le réseau est composé de 100 nœuds capteurs, allant de 10 à 100 déployés de façon déterministe sur une zone de dimensions (50 X 50) m². Nous avons fait varier le rayon de capture de 10 m à 30 par pas de 5 m.

L'évaluation de la couverture est effectuée grâce à la méthode découpe dont SPMC-WSN reprend l'algorithme.

La bande de base est dite couverte si et seulement tous les rectangles qui la composent sont couverts. Le pourcentage du taux de couverture est le rapport entre le nombre de rectangles couverts sur le nombre total de rectangles de la zone de couverture.

IV.3 Les paramètres de performances

Dans la littérature, on retrouve plusieurs paramètres de simulations comme le taux de couverture et le pourcentage de capteurs actifs [CW05, AG07]. Ces paramètres sont souvent employés pour l'évaluation des solutions proposées pour le problème de couverture de zone.

Notre évaluation des performances de SPMC-WSN s'est effectuée uniquement par la considération des paramètres suivants :

- **Le taux de couverture** : est le pourcentage moyen des rectangles couverts par l'ensemble des capteurs actifs dans la zone de

couverture.

- **Le pourcentage des capteurs actifs** : est le rapport entre le nombre de capteurs actifs et le nombre des capteurs déployés dans la zone de couverture. Nous supposons qu'un capteur est couvert si et seulement si son centre est couvert.

IV.3 Évaluation de SPMC-WSN par rapport à [CWT04]

Dans cette section, nous évaluons notre approche SPMC-WSN à travers une simulation de 100 capteurs déployés sur une zone d'intérêt de dimension 50m x 50m avec un rayon de capture de 10m. Les autres critères de performances comme le taux de couverture n'ont pas été évalués dans [CWT04].

- **Nombre de capteurs actifs**

Nous évaluons l'impact du facteur de densité des capteurs sur le nombre de capteurs actifs avec des capteurs variant de 10 à 200 par pas de 20.

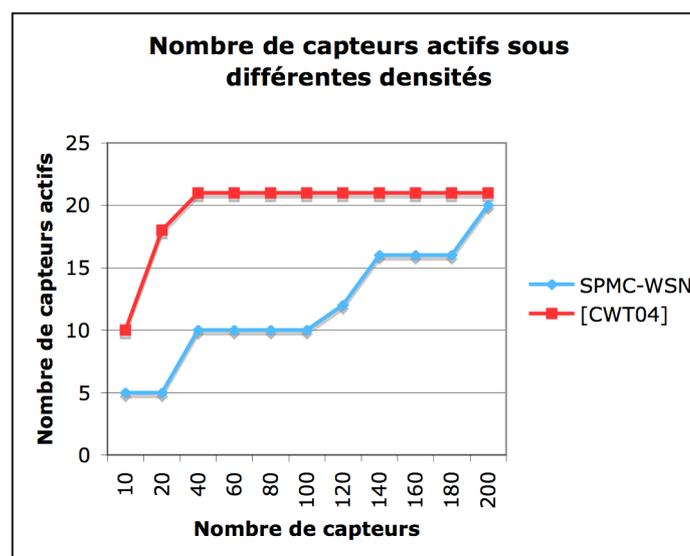


Figure IV.60 : Nombre de capteurs actifs sous différentes densités.

La figure IV.60 montre que notre approche rivalise parfaitement avec l'approche de Chen et al. [CWT04] en termes de capteurs actifs.

IV.4 Conclusion

Nous avons présenté SPMC-WSN, une approche modélisant le problème de couverture dans les réseaux de capteurs sans fils par celui de la découpe, un problème très cité dans la littérature.

Étant donné le type de ce réseau, nous avons pu démontrer à travers les résultats de simulations obtenus à ce jour, que notre approche est prometteuse comme en témoigne celle que nous avons présentée en terme de capteurs actifs par rapport à [CWT04].

Enfin, grâce aux concepts définis et règles d'ordonnancement proposées, SPMC-WSN réduit considérablement le nombre de capteurs actifs sans influencer sur le taux de couverture.

Nous avons proposé une approche nommée SPMC-WSN pour la résolution du problème de couverture. L'approche SPMC-WSN modélise le problème de couverture comme étant un problème de découpe issu de la recherche opérationnelle. SPMC-WSN vise à assurer un pourcentage de couverture maximal, garantir le moins de chevauchements entre les capteurs, minimiser le nombre de capteurs afin de garantir une meilleure longévité du réseau.

Nous avons testé et validé notre approche grâce à un outil de simulation développé en langage Java. À travers les simulations, nous avons montré qu'elle rivalise parfaitement avec des solutions existantes en termes de pourcentage de capteurs actifs.

Comme perspectives de recherches, nous envisagerons de revoir les hypothèses de travail notamment le type de réseaux considérés sous la contrainte de l'énergie. En effet, il s'agira de réévaluer la couverture dans un réseau de capteurs hétérogènes.

À long terme, il est pertinent de reprendre le travail de [WM08] en tenant compte de la mobilité des capteurs pour la construction des mailles et cela avec la contrainte que les capteurs ne disposent pas de dispositifs de localisation (GPS) qui induit un coût supplémentaire. Ajouté à cela, le recours aux méthodes d'optimisations comme celle d'essaim de particules permettra sans doute d'améliorer le processus de guérison des trous de couvertures.

Références bibliographique

[ASSC02] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Eredal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks*, 38(4) :393-422, 2002.

[CES04] David Culler, Deborah Estrin, and Mani Srivastava. Guest editors' introduction: Overview of sensor networks. *Computer*, 37(8) :41-49, August 2004.

[CW05] Cardei, M. and Wu, J. « Coverage in Wireless Sensor Networks » in Ilyas, M. Mahgoub, I. « Handbook of Sensor Networks : Compact Wireless and Wired Sensing Systems », CRC Press, United State of America (2005).

[G92] Gage, D.W, « Command Control for Many-Robot Systems, » AUVS-92, The Nineteenth Annual AUVS Technical Symposium, Huntsville AL, 22-24 June 1992. Reprinted in *Unmanned Systems Magazine*, Vol. 10, No. 4, pp 28-34, Fall 1992.

[Kovacs98] G.T.A. Kovacs, *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, Boston, 1998.

[AD04] A. Arora, P. Dutta, et. al, “A Line in the Sand:A Wireless Sensor Network for Target Detection, Classification, and Tracking, *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*”, Volume 46 Issue 5, December 2004.

[ISKDPKBM04] S. S. Iyengar , G. Seetharaman, R. Kannan, A. Durrezi, S. Park , B. Krishnamachari, R. R. Brooks and J. Morrison 1st LT USAF. « Next Generation Distributed Sensor Networks ». *Proceedings of Office of Naval Research*, September 5-6, 2004, USA

[MKPS05] Megerian, S., Koushanfar, F., Potkonjak, M., and Srivastava, M. « worst and Best-case Coverage in Sensor Networks » *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Volume 4, Issue 1, Jan-Feb 2005 Page(s) :84-92.

[W03] D. B. West, *Introduction to Graph Theory*, 2nd ed., Prentice-Hall, Aug. 2003.

[NKW09] Nor Azlina Ab. Aziz, Kamarulzaman Ab. Aziz, Wan Zakiah Wan Ismail. «Coverage Strategies for Wireless Sensor Networks ». *World Academy of Science, Engineering and Technology* 50 2009.

[ACG12] D.G. Anand, H.G. Chandrakanth and M.N. Giriprasad,« A survey on connectivity monitoring and maintenance for wireless sensor network ».

International Journal of Information Technology and Knowledge Management January-June 2012, Volume 5, No. 1, pp. 185-190.

[ZH04] Zhang, H. and Hou, J. C., “Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks”, In NSF International Workshop on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks, 2004.

[KS78] L. Kleinrock and J. Silvester., “Optimum Transmission Radio for Packet Radio Networks or Why Six is a Magic Number”, In National Telecommunications Conference, Birmingham, Alabama, pp. 432–435, December 1978.

[SLA06] Subhash Suri, Leonidas J. Guibas, Alon Efrat « Geometric Approaches to Ad Hoc and Sensor Networks ». Full Report of the 2006 NSF Workshop.

[MI05] M. Ilyas and I. Mahgoub. " Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems", ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.

[MA02] A. Manjeshwar and D. P. Agarwal. "Apteen : A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks", Parallel and distributed processing Symposium. Proceedings International, IPDPS, pp. 195-202, 2002.

[MA10] Raymond Mulligan, Habib M. Ammari. « Coverage in Wireless Sensor Networks : A Survey ». In Network Protocol and Algorithms ISSN 1943-3581, 2010, Vol. 2, No. 2, Macrothink Institute.

[SS11] Sadou Malika, Saidani Nadjette « Méthodes géométriques pour la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil ». Mémoire de Master Recherche en Informatique, Université de Béjaia, 2010-2011.

[BNL09] Azzedine Boukerche, Eduardo F.Nakamura, Antonio A.F. Loureiro. « Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks », Edited By Azzedine Boukerche, 2009 by Jhon Wiley & Sons Inc.

[MB08] Sofiane Moad, Nizar Bouabdellah « La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », Mémoire de Master 2 Recherche en Informatique, IFSIC-Université de Rennes 1, 2007/2008.

[YMG08] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, Dipak Ghosal. Wireless sensor network survey. Computer Networks, Elsevier, 2008.

[MEK08] M.E.Khanouche. « Le traitement de problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil ». Thèse de magistère en Informatique, Université de Bejaia, Algérie, 2008.

[CW05] M. Cardei, Thai, Li, Wu. « Energy-Efficient Target Coverage in Wireless Sensor Networks ». In 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies,3:1976-1984, Florida Atlantic .2005.

[WB09] W.Y.Poe, B. Schmitt. « Node Deployment in Large Wireless Sensor Networks: Coverage, Energy Consumption, and Worst-Cas Delay ». AINTEC'09, Bangkok, Thailand, 2009.

[AOF?] Antonio Otavio Fernandes « Provisioning the Performance in Wireless Sensor Networks through Computational GeometryAlgorithms » Departement of Computer Science Federal University of Gerais, Belo Horizonte, MG 31270-010, Brazil.

[AG07] A. Gallais. « Ordonnancement d'activité dans les réseaux de capteurs : l'exemple de la couverture de surface ». Université Des Sciences et Technologies de Lille, France, 2007.

[ZZSH12] Chuan Zhu, Chunlin Zheng , Lei Shu , Guangjie Han. “A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks”. Elsevier. Journal of Network and Computer Application, 2012.

[KHMD09] Benahmed Khelifa, H. Haffaf, Merabti Madjid, and David Llewellyn-Jones. « Monitoring Connectivity in Wireless Sensor Networks ». International of Future Generation Communication and Networking Vol.2, No.2, June, 2009.

[CWT04] Haining Chen, Hongyi Wu, and Nian-Feng Tzeng. « Grid-based Approach for Working Node Selection in Wireless Sensor Networks ». Center For Advanced Computer Studies University of Louiziana at Lafayette. published in IEEE Communications Society, 2004.

[SCC08] Jang-Ping Sheu, Guey-Yun Chang, and Yen-Ting Chen. « A Novel Approach for k-Coverage Rate Evaluation and Re-deployment in Wireless Sensor Networks ». Proceedings of IEEE Communication Society, GLOBECOM 2008.

[SCS06] Xingfa Shen, Jiming Chen, and Youxian Sun, « Grid Scan : a simple and effective approach for coverage issue in wireless sensor networks » Proceedings of the International Conference on Communications (ICC), vol. 8, pp.3480-3484, 2006.

[WLC07] Chun-Hsin Wu, Kuo-Chuan Lee, Yeh-Ching Chung, «A Delaunay Triangulation based method for wireless sensor network deployment», *Computer Communications* 30 (2007), pp.2744-2752, ScienceDirect, ELSEVIER.

[WM07] Jiong Wang, Sirisha Medidi, « Energy Efficient Coverage with Variable Sensing Radii in Wireless Sensor Networks ». School of Electrical Engineering and Computer Science, Washington State University, Pullman, Washington. The work is supported in part by the NSF.

[RNRH11] Nacim Rahmani, Farhad Nematy, Amir Masoud Rahmani, Mehdi Hoesseinzadeh. « Node Placement for Maximum Coverage Based on Voronoi Diagram Using Genetic Algorithm in Wireless Sensor Networks ». *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5 (12) : 3221-3232, 2011. ISSN 1991-8187.

[DL05] Xiaojiang Du, Fengjing Lin, « Improving Sensor Network Performance by Deploying Mobile Sensors ». Department of Computer Science North Dakota State University.

[VL09] Chinh T. Vu, Yingshu Li, « Delaunay-Triangulation based complete coverage in wireless sensor networks ». Computer Science Department Georgia State University Atlanta, Georgia.

[WM08] Jiong Wang, Sirisha Medidi, « Mesh-Based Coverage for Wireless Sensor Networks ». *Proceedings of IEEE Communication Society, GLOBECOM 2008*.

[HV03] N. Heo and P. Varshney, “A distributed self spreading algorithm for mobile wireless sensor networks”, *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC2003. 2003 IEEE*, vol.3, pp.1597-1602 vol.3, March 2003.

[MCE03] Said Ben Messaoud, Chengbin Chu, Marie-Laure Espineuse, “SHF: une nouvelle heuristique pour le problème de découpe guillotine en 2D”, 4e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation “Organisation et Conduite d’Activités dans l’Industrie et les Services” MOSIM’03 -du 23 au 25 avril 2003- Toulouse (France).

[AG07] A. Gallais. *Ordonnement 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.

Webographie

[Web1] <http://www.senseur.com/>

[Web2] <http://www.businessweek.com/datedtoc/1999/9935.htm>. 21 ideas for the 21st century.

[Web3] Crossbow Technology Inc., 2009, <http://www.xbow.com/>.

[Web4] www.nasa.gov

Résumé

Ces dernières années, les réseaux de capteurs sans fil ont pris un essor considérable grâce aux progrès récents dans le domaine de la microélectronique. Toutefois, l'un des problèmes majeurs ayant attiré l'attention des chercheurs est sans doute celui de la couverture dont l'objectif est de surveiller de façon continue une zone d'intérêt. Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature. Ces approches, le plus souvent font appel aux méthodes géométriques et celles à base de grilles.

Dans ce travail, nous proposons une approche pour la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil, nommée SPMC-WSN (Strip Packing Method for Coverage in Wireless Sensor networks). La motivation principale était de modéliser le problème de couverture par celui de la découpe, un problème issu de la recherche opérationnelle. De plus, SPMC-WSN exploite la technique d'ordonnement d'activité à travers quelques règles issues du problème des huit reines, pour garantir une meilleure longévité du réseau et réduire la consommation énergétique.

Les résultats expérimentaux montrent que notre approche SPMC-WSN rivalise parfaitement avec certaines approches de la littérature. Ajouté à cela, le nombre de capteurs actifs diminue de façon considérable suivant les caractéristiques des capteurs en termes de rayon de couverture.

Mots clés: Réseaux de capteurs sans fil, Couverture, Ordonnement d'activité, méthode de découpe.

Abstract

In recent years, sensor networks Wireless has grown considerably thanks to recent advances in the field of microelectronics. However, one of the major problems that have attracted the attention of researchers is undoubtedly that of the coverage problem where the objective is to continuously monitor an area of interest. Several approaches have been proposed in the literature. These approaches, often make use of geometric methods and those based on grids.

In this work, we propose an approach for coverage in wireless sensor networks called SPMC-WSN (Strip Packing Method for Coverage in Wireless Sensor Networks). The main motivation was the modeling of the coverage problem as a strip packing problem; a well known problem in Operational Research cited in literature. Moreover, SPMC-WSN exploits the technique of scheduling activity through the eight queen's problem to ensure greater longevity of the network and reduce energy consumption.

Experimental results show that SPMC-WSN outperforms some approaches of the literature. Added to this, the number of active sensors decreases significantly following sensor characteristics in terms of coverage radius.

Key words: Wireless Sensor Networks, Coverage, Scheduling activity, Strip Packing Method.