

***Table des matières***

Dédicaces .....	i
Remerciements .....	ii
Résumé .....	iii
Abstract.....	v
Table des matières .....	vi
Liste des figures .....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Liste des abréviations .....	xii
<b>Chapitre I : Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
I.1. Problématique.....	2
I.2. Objectifs .....	3
I.3. Contributions.....	3
I.3.1. Déploiement exact et heuristique des WSNs.....	4
I.3.2. Déploiement hybride et multiobjectif des WSNs.....	4
I.4. Organisation du manuscrit.....	5
<b>Chapitre II : Les Réseaux de Capteurs sans Fil .....</b>	<b>7</b>
II.1. Introduction .....	8
II.2. Définitions.....	8
II.2.1. Réseau de capteurs sans fil.....	8
II.2.2. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil .....	9
II.2.3. Composants matériels d'un capteur .....	10
II.2.4. Mode de transmission de données.....	13
II.3. Caractéristiques des WSNs.....	14
II.4. Comparaison entre WSNs et réseaux sans fil traditionnels .....	16
II.5. Types des réseaux de capteurs sans fil.....	17
II.6. Domaines d'application .....	20
II.7. Les Standards de communication des WSNs .....	22
II.7.1. IEEE 802.15.4.....	22
II.7.2. ZIGBEE.....	23
II.7.3. 6LoWPAN .....	23

## Table des matières

---

II.7.4.	IEEE 802.15.3.....	23
II.7.5.	Wibree .....	24
II.8.	Les défis des WSNs.....	24
II.8.1.	Le déploiement des capteurs.....	24
II.8.2.	La topologie .....	25
II.8.3.	La couverture.....	26
II.8.4.	La k-couverture.....	28
II.8.5.	La connectivité .....	30
II.8.6.	L'énergie dans les réseaux de capteurs .....	31
II.9.	Conclusion .....	37
<b>Chapitre III : Stratégies de Déploiement des Capteurs dans les WSNs.....</b>		39
III.1.	Introduction.....	40
III.2.	Les méthodes de déploiement.....	40
III.2.1.	Déploiement aléatoire .....	40
III.2.2.	Déploiement déterministe .....	41
III.2.3.	éploiement hybride .....	42
III.3.	Objectifs du déploiement.....	42
III.4.	Les approches de solution pour le déploiement des WSNs .....	43
III.4.1.	Techniques basées sur le diagramme de Voronoï .....	43
III.4.2.	Techniques basées sur la programmation linaire en nombres entiers.....	46
III.4.3.	Techniques basées sur les heuristiques .....	46
III.4.4.	Techniques bio inspirées.....	47
III.5.	Classification des stratégies de déploiement par objectif.....	49
III.5.1.	La couverture .....	49
III.5.2.	Le coût .....	57
III.5.3.	La connectivité .....	60
III.5.4.	La durée de vie .....	62
III.5.5.	Discussion .....	64
III.6.	Conclusion .....	66
<b>Chapitre IV : Déploiement Exact et Heuristique des Capteurs dans les WSNs .....</b>		67
IV.1.	Introduction.....	68
IV.2.	Programmation linéaire en nombres entiers .....	68
IV.2.1.	La programmation linéaire .....	68

## Table des matières

---

IV.2.2.	La programmation linéaire en nombres entiers .....	69
IV.2.3.	Méthodes de résolution approchée.....	70
IV.3.	La problématique .....	71
IV.4.	Les approches de déploiement proposées.....	72
IV.4.1.	L'approche ED3C .....	72
IV.4.2.	L'approche HD3C.....	75
IV.5.	Maximisation de la durée de vie .....	76
IV.6.	Résultats numériques .....	81
IV.7.	Conclusion .....	84
<b>Chapitre V : Déploiement Hybride et Multiobjectif des Capteurs dans les WSNs</b> ....		86
V.1.	Inrtoduction .....	87
V.2.	Problème de placement optimal de capteur .....	87
V.2.1.	Modèle sans contrainte de durée de vie « Lifetime-Unaware Model ».....	88
V.2.2.	Les modèles avec contrainte de durée de vie.....	90
V.3.	Approches heuristiques.....	94
V.3.1.	Fixage séquentiel de couverture à la fois.....	95
V.3.2.	Fixage séquentiel d'un seul capteur.....	96
V.3.3.	Fixage séquentiel d'une seule cible .....	97
V.4.	Résultats et évaluation des performances .....	97
V.4.1.	Présentation de « IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ».....	98
V.4.2.	Environnement d'expérimentation.....	98
V.4.3.	Comparaison entre l'approche exacte et les approches heuristiques .....	99
V.4.4.	Comparaison entre les approches exactes : LUM, PLAM et MLAM .....	101
V.4.5.	Impact des paramètres du réseau .....	104
V.4.6.	Impact de la k-couverture.....	106
V.5.	Conclusion .....	107
<b>Chapitre VI : Conclusion Générale et Perspectives</b> .....		108
VI.1.	Conclusion générale.....	109
VI.2.	Perspectives.....	110
Conférences et publications internationales .....		111
Bibliographie .....		112

## *Liste des figures*

Figure II.1. Architecture d'un réseau de capteurs .....	10
Figure II.2. Composants matériels d'un capteur.....	11
Figure II.3. Zone de couverture .....	27
Figure II.4. Types de couverture.....	29
Figure II.5. k-connectivité .....	31
Figure III.1. Les méthodes de déploiement.....	40
Figure III.2. Déploiement de capteur basé sur des grilles .....	41
Figure III.3. Modèles réguliers de déploiement déterministe.....	42
Figure III.4. Le milieu d'un segment.....	44
Figure III.5. Construction d'un diagramme de Voronoï de 2 points .....	44
Figure III.6. Construction d'un diagramme de Voronoï de 3 points .....	45
Figure III.7. Construction d'un diagramme de Voronoï de plusieurs points.....	45
Figure III.8. Les étapes de la triangulation de Delaunay .....	45
Figure III.9. Triangulation de Delaunay .....	46
Figure III.10. Le modèle de triangle .....	52
Figure III.11. Le modèle de carré.....	52
Figure III.12. Le modèle d'hexagone .....	53
Figure III.13. Le modèle de bande horizontale .....	53
Figure III.14. Les trous de couverture (Nemati & Rahmani, 2013) .....	55
Figure III.15. Déploiement aléatoire de 100 capteurs dans le champ de capture (Abhishek, Sunandita, & Ashraf, 2016) .....	56
Figure III.16. Déploiement circulaire (Kirankumar, Ayashree, & Mallapur, 2015) .....	56
Figure III.17. Structure d'un Chromosome dans le cas de (Zorlu & Ozgur, 2016) .....	59
Figure III.18. Illustration du modèle couverture en disque et le modèle de CIC (Huping, Jiajun, & Bang, 2015).....	61
Figure III.19. La durée de vie du réseau (Jiguo, Ying, Liran, Baogui, & Xiuzhen, 2016) ....	64
Figure IV.1. Les étapes principales de l'approche HD3C.....	75
Figure IV.2. Le modèle d'énergie .....	78
Figure IV.3. Nombre de capteurs déployés.....	81

## Liste des figures

---

Figure IV.4. Le temps de calcul.....	82
Figure IV.5. La durée de vie .....	83
Figure IV.6. Nombre de capteurs morts.....	83
Figure IV.7. Nombre de capteurs redondants .....	84
Figure V.1. Exemples de topologie de déploiement des capteurs .....	92
Figure V.2. Les étapes du SF .....	95
Figure V.3. Évolution d'intervalle entre la meilleure solution de MILP et la limite de LP99	
Figure V.4. Nombre de capteurs déployés pour 20 cibles .....	102
Figure V.5. Durée de vie pour 20 cibles .....	102
Figure V.6. Energie consommée pour 20 cibles.....	103
Figure V.7. La durée de vie assurée pour 20 cibles .....	103
Figure V.8. Energie consommée .....	103
Figure V.9. La durée de vie.....	104
Figure V.10. Nombre de capteurs déployés sous différentes durées de vie .....	104
Figure V.11. Nombre de capteurs déployés sous différente taille de grille .....	105
Figure V.12. Nombre de capteurs déployés sous différent rayon de couverture.....	106
Figure V.13. Nombre de capteurs déployés sous différents k-couverture.....	106

***Liste des tableaux***

Tableau III.1. Classification des stratégies de déploiement des WSNs.....	65
Tableau IV.1. Les paramètres du modèle .....	72
Tableau IV.2. Les variables du modèle .....	73
Tableau IV.3. Paramètres du modèle d'énergie .....	77
Tableau IV.4. Le temps de calcul.....	82
Tableau V.1. Paramètres et variables du modèle .....	89
Tableau V.2. Temps de calcul des approches heuristiques pour 40 cibles .....	100
Tableau V.3. Solutions et gaps pour 20 cibles .....	101
Tableau V.4. Solutions et gaps pour 40 cibles .....	101

***Liste des abréviations***

6LoWPAN	IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks
ABC	Artificial Bee Colony Algorithm
ACO	Ant Colony Optimization
API	Application Programming Interface
BFO	Bacterial Foraging Optimization Algorithm
CCF	Connected Cover Formation
CCTCk	Centralized Connected Target k-Coverage algorithm
CFRP-RR	Cover Formation and Relay Placement with Redundancy Removal
CIC	Confident Information Coverage
CO-SF	Cover at Once Sequential Fixing
CPU	Central Processing Unit
CR	Communication Relay
CTCk	Connected Target k-Coverage
DCTCk	Distributed Connected Target k-Coverage algorithm
ED3C	Exact Deployment under Coverage, Connectivity and Cost
FSA	Fish Swarm Algorithm
GHz	GigaHertz
HD3C	Heuristic Deployment under Coverage, Connectivity and Cost
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ILP	Integer Linear Programming
ISM	Industriel - Scientifique - Medical
kbps	Kilo bits par seconde
LEGD	Lifetime Enhancement for a Given Duration
LP	Linear Programming
LUM	Lifetime-Unaware Model
Max-Cov-Tp	Maximum number of Covered Target points
MHz	MegaHertz
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MLAM	Maximum Lifetime-Aware Model

## Liste des abréviations

---

NP	Non-deterministic Polynomial-time
PC	Personnel Computer
PL	Programme Linéaire
PLAM	Predefined Lifetime-Aware Model
PLNE	Programmation Linéaire en Nombres Entiers
RAM	Random Access Memory
RFID	Radio Frequency IDentification
SC	Sensing Coverage
SF	Sequential Fixing
SS-SF	Single Sensor Sequential Fixing
ST-SF	Single Target Sequential Fixing
TPSMA	Territorial Predator Scent Marking Algorithm
WSN	Wireless Sensor Network

# **Chapitre I**

## **Introduction Générale**

### I.1. Problématique

La fusion de deux pôles de l'informatique moderne, à savoir les systèmes embarqués et les communications sans fil, a donné naissance à des microcomposants communicants, appelés capteurs, équipés d'une unité de mesure, d'une unité de calcul, de mémoires et d'un émetteur/récepteur radio pour communiquer. Le déploiement de plusieurs d'entre eux, en vue de collecter et transmettre de manière autonome des données concernant l'environnement d'étude vers un ou plusieurs points de collecte appelé(s) puits (Sink), , forme un réseau de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network, WSN).

Depuis leur création, les réseaux de communication sans fil ont connu un grand succès au sein du grand public. Grâce à ses divers avantages, cette technologie a pu s'instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux actuelles. En effet, de nombreux domaines d'application sont alors possibles tels que la détection et la surveillance des désastres, le contrôle de l'environnement, le bâtiment intelligent, l'agriculture de précision, la surveillance et la maintenance préventive des machines, la médecine et les transports intelligents. Les exigences diffèrent d'un réseau à l'autre selon la nature et les besoins de l'application finale.

Les réseaux de capteurs sans fil ont fait l'objet d'une activité de recherche intensive, dont l'objectif est de produire des réponses aux caractéristiques et limitations qui leur sont associées. En particulier, la gestion efficace des ressources énergétiques ainsi que l'optimisation du coût continuent d'être un domaine de recherche très fertile.

Parmi les nombreux défis que posent ces réseaux, la stratégie de déploiement des capteurs sans un espace géographique est l'un des points clé, dans la mesure où il détermine de manière importante à la fois le coût, la connectivité, la couverture et la durée de vie du réseau. La connectivité et la couverture reflètent la qualité du réseau, elles décrivent sa capacité d'une part à faire circuler les informations et d'autre part sa capacité à interagir avec le monde extérieur.

Cependant, du fait que les réseaux de capteurs sont caractérisés par de nombreuses contraintes (coût, couverture, connectivité et l'énergie limitée), le bon déploiement du

réseau est loin d'être une tâche triviale. En effet, le placement des capteurs a des conséquences directes sur la couverture et la gestion des ressources. Un défi principal dans le déploiement est de déterminer les emplacements de capteurs qui à la fois optimisent le coût du réseau et fournissent une couverture acceptables des cibles. Cependant, notons que le problème de placement optimal des capteurs est un problème de type NP-difficile pour la plupart des formulations de déploiement des capteurs (Cheng, Du, Wang, & Xu, 2008).

### I.2. Objectifs

L'objectif principal de notre travail est de proposer un outil d'optimisation capable d'aider les concepteurs des WSNs lors de la phase de déploiement. Pour pouvoir développer un tel outil, une bonne modélisation du système est nécessaire en premier. Les approches que nous proposons sont basées sur la programmation mathématiques et visent à assurer un déploiement optimal, ou du moins proche de l'optimal, des WSNs en prenant en considération quatre propriétés fondamentales :

1. **La couverture** : le réseau doit couvrir toutes les cibles.
2. **La durée de vie du réseau** : le réseau doit assurer une durée de vie prédéfinie, ce qui permet d'amortir les coûts d'investissement et d'installation, et réduire les coûts d'installation de maintenance
3. **Le coût** : le réseau installé doit avoir un coût de déploiement minimal pour demeurer accessible au plus grand nombre d'entreprises et d'institutions.
4. **La connectivité** : tous les capteurs du réseau doivent pouvoir acheminer des données au Sink.

### I.3. Contributions

Dans le but de répondre aux différentes exigences des WSNs, nous avons conçu divers outils de déploiement en utilisant des techniques différentes. Nous les décrivons dans la suite.

### **I.3.1. Déploiement exact et heuristique des WSNs**

Nous avons proposé deux approches dans le but de fournir une stratégie de déploiement assurant les contraintes de couverture, connectivité et du coût. La première basée sur la programmation linéaire en nombres entiers et la deuxième est une approche heuristique.

En outre, nous avons traité le problème de la prolongation de la durée de vie du réseau. Pour cela, une autre approche a été réalisée pour prolonger la durée de vie par le doublement des capteurs incapables d'assurer leurs tâches pendant toute la durée spécifiée.

### **I.3.2. Déploiement hybride et multiobjectif des WSNs**

La première approche principale est un programme linéaire en nombres entiers mixtes qui fournit une stratégie de placement optimale des capteurs. Nous avons tenu compte de plusieurs contraintes pour assurer la qualité du service du réseau de capteurs. Nous avons proposé deux modèles de déploiement avec la programmation linéaire en nombres entiers mixtes:

#### **1. Modèle sans contrainte de durée de vie :**

Ce modèle fournit une stratégie de placement optimale (minimise le coût) des capteurs et assure la couverture et la connectivité du réseau.

#### **2. Les modèles avec contrainte de durée de vie :**

La minimisation du nombre de capteurs déployés produit généralement des topologies réseau en arbre. L'inconvénient de cette architecture est l'épuisement rapide d'énergie des capteurs proches du Sink. En effet, ces capteurs sont exploités de manière intensive intensément pour relayer les données car ils sont sur le chemin emprunté par la quasi-totalité des communications. Par conséquent, ils utilisent non seulement plus de ressources énergétiques que les autres capteurs du réseau mais provoquent de forte congestion et de fortes pertes de données dans les réseaux à grande échelle. Ceci a donc des conséquences non seulement sur la durée de vie du réseau, mais aussi sur les délais

d'acheminement des paquets et le taux de livraison de données. Afin de remédier à ce problème, nous avons proposé d'intégrer la contrainte d'énergie dans l'approche de déploiement en intégrant les contraintes de consommation d'énergie ou de durée de vie, à toutes les contraintes de placement précédentes (coût, couverture et connectivité). A cet effet, nous proposons deux alternatives :

- **Modèle avec durée de vie prédefinie:** le déploiement des capteurs doit considérer une certaine durée de vie à atteindre.
- **Modèle avec durée de vie maximale:** le déploiement des capteurs doit maximiser la durée de vie en n'utilisant que le nombre optimal de capteurs nécessaire à la mise en œuvre du réseau. Nous avons utilisé l'optimisation multi-objectif pour résoudre ce problème.

Par ailleurs, le temps de résolution nécessaire à l'obtention d'une solution optimale est un paramètre critique. En raison de la complexité de nos modèles de leur nature NP-difficile, qui fait que la résolution de certaines instances de grande taille nécessite un temps trop long, nous avons proposé des approches basées sur la technique du *fixage séquentiel* de la programmation linéaire. L'idée principale consiste à décomposer un problème linaire en nombre entiers en une suite de problème linaires avec seulement des variables continues, qui peut se résoudre en temps polynomial. Ces approches ne fournissent pas bien entendu toujours des solutions optimales, mais produisent des résultats valides et assez proches de l'optimal, comme l'attestent nos résultats numériques, tout en étant relativement rapides.

### I.4. Organisation du manuscrit

Cette thèse est organisée en six chapitres. Le chapitre II consiste en une introduction générale aux réseaux de capteurs sans fil : architectures, applications courantes, caractéristiques, problématiques et standards.

Le chapitre III a pour objectif d'introduire le problème de déploiement des réseaux de capteur sans fil et fournit une classification des solutions proposées et les différentes techniques utilisées.

## **Chapitre I: Introduction générale**

---

Le chapitre IV présente la première contribution au problème de déploiement. Nous détaillons les approches proposées, leur modélisation, techniques de résolution, et quelques résultats numériques.

Le chapitre V présente la deuxième contribution au problème de déploiement. Dans la première partie, nous avons détaillé les approches exactes. La deuxième partie porte en premier lieu sur la technique du *fixage séquentiel* en général. Ensuite, nous discutons la modélisation des solutions mixtes proposées et les résultats d'évaluation.

Le dernier chapitre conclut cette thèse où nous exposons également quelques perspectives de développements futurs à ce travail.

# **Chapitre II**

## **Les Réseaux de Capteurs sans Fil**

### II.1. Introduction

Les récentes avancées technologiques confortent la présence de l'informatique et de l'électronique au cœur du monde réel. De plus en plus d'objets se voient ainsi équiper de processeurs et de moyens de communication leur permettant de traiter des informations mais également de les transmettre. Pour cela, ils doivent être capables de détecter un changement dans leur environnement et d'y réagir en fonction notamment des besoins de l'utilisateur.

Grâce au progrès fait dans le domaine de la miniaturisation des systèmes de micro-électro-mécanique et dans le marché des réseaux et des applications sans fil, s'est créée une branche de réseaux afin d'offrir des solutions pratiques et performantes pour la surveillance à distance et le traitement des données dans des environnements complexes : les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks).

Dans ce chapitre, nous présentons les réseaux de capteurs sans fil, leurs types, leurs applications ainsi que les différents concepts liés aux réseaux de capteurs sans fil tel que la couverture et la connectivité. Nous discutons également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des WSNs, tel que la consommation d'énergie.

### II.2. Définitions

Les capteurs sans fil sont des dispositifs de taille réduite avec des ressources très limitées. Autonomes, ils sont capables de récolter, traiter et transmettre des informations, via les ondes radio, à une autre entité (capteurs, unité de traitement...), mais sur une distance parfois très limitée.

#### II.2.1. Réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteur sans fil (WSN) est un type de réseaux ad hoc, composé d'un ensemble de nœuds capteurs. Ces capteurs sont déployés sur une surface géographique en vue de superviser certains phénomènes environnementaux. Chacun de ces capteurs a la capacité de collecter des données et de les transférer à un nœud passerelle (Sink en anglais ou puits) par l'intermédiaire d'un mode de communication multi-sauts. Le Sink

transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite à un hôte central pour analyser ces données et prendre des décisions (Challal, 2016). La position des nœuds n'est pas obligatoirement pré-déterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée «champ de capture», correspondant au terrain d'intérêt du phénomène surveillé.

### II.2.2. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

L'architecture d'un réseau de capteurs sans fil inclut une plateforme matérielle et un système d'exploitation comme TinyOS. Les composants principaux d'un WSN sont :

**Le champ de capture** : la zone dans laquelle des nœuds de capteur sont déployés.

**Le nœud capteur** : les capteurs sont responsables de recueillir l'information et de la router vers le Sink. Il existe deux types de nœud capteur : les capteurs fixes et les capteurs mobiles.

**Capteur fixe**: un capteur fixe a la capacité de détecter et collecter des données sur l'environnement, d'envoyer ou de recevoir des messages et de traiter des données. Typiquement, ces capteurs ne se déplacent pas une fois qu'ils sont déployés.

**Capteur mobile**: un capteur mobile a non seulement toutes les caractéristiques d'un capteur fixe, mais a également une certaine mobilité. Étant donné que la couverture et la connectivité sont des considérations cruciales pour les WSN, la défaillance d'un capteur peut entraîner la partition du réseau en segments disjoints, ce qui génère des trous de couverture ou la perte de connectivité. Un capteur mobile peut se déplacer pour résoudre ces problèmes. Les capteurs mobiles sont alors chargés de surveiller la zone non couverte ou de router les données récoltées.

Dans les nombreux cas, tous les capteurs d'une application sont considérés comme homogènes : ils ont donc une même capacité de calcul, de communication, de mémoire et de ressources énergétiques. Par contre, certaines applications intègrent des nœuds spéciaux plus puissants que d'autres qui seront chargés d'effectuer les tâches les plus

coûteuses en termes de ressources énergétiques. En fonction de l'application, certains capteurs peuvent avoir donc des rôles différents, générant une architecture hétérogène.

**Le Sink :** c'est également un capteur qui accomplit une tâche spéciale de recevoir, de traiter et d'enregistrer les données provenant des autres nœuds capteurs. Dans un réseau de capteurs, le Sink détient un rôle très important et doit donc posséder des capacités supérieures en termes de puissance de traitement, de capacité de mémoire et d'autonomie énergétique

Un WSN peut aussi être doté d'un Sink mobile capable de collecter des données directement à partir des capteurs statiques. Les capteurs attendent le passage du Sink mobile pour lui envoyer leurs messages de telle sorte que la communication ait lieu à proximité (directement ou au plus avec un nombre limité de sauts).

**La station de base :** c'est un point centralisé de contrôle dans le réseau employé pour extraire l'information à partir du réseau et passer des informations de contrôle au réseau (Ankita, 2014).

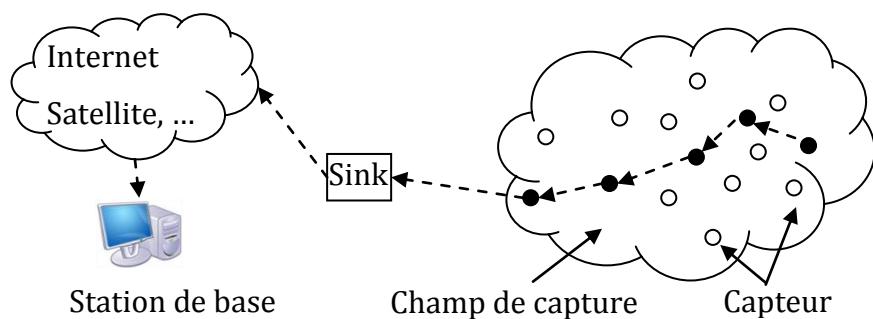


Figure II.1. Architecture d'un réseau de capteurs

### II.2.3. Composants matériels d'un capteur

Suivant le type d'application, il existe une multitude de capteurs sur le marché: capteur de température, d'humidité, de pression, etc. Cependant, malgré cette diversité apparente, ils restent dotés d'une architecture similaire. Un capteur est composé

principalement des modules suivants : acquisition, traitement, stockage des données, communication radio et alimentation en énergie. Des composants supplémentaires peuvent être ajoutés selon le domaine d'application, tels qu'un système de localisation GPS (Global Positioning System), un générateur d'énergie (par exemple, des cellules solaires) ou un dispositif mobile lui permettant de se déplacer. Ces modules principaux sont présentés dans la Figure II.2. (Younes, 2012). Nous détaillons ci-dessous les fonctions de chaque module.

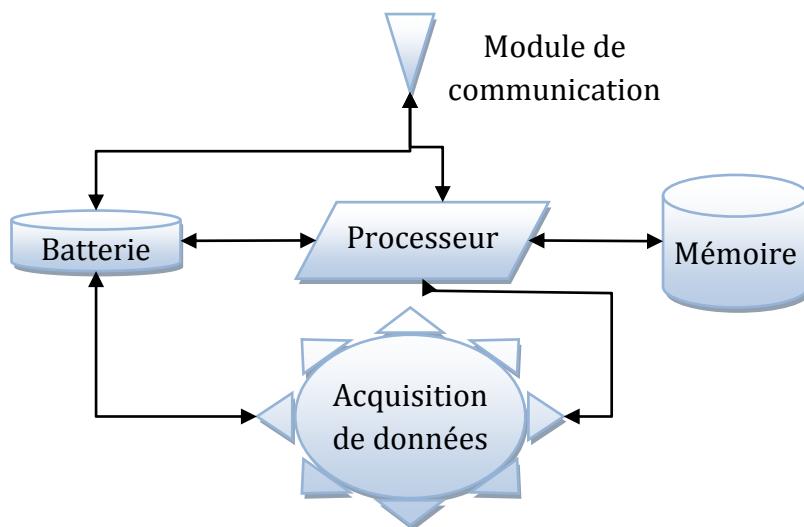


Figure II.2. Composants matériels d'un capteur

### Module d'acquisition de données

La fonction principale du module d'acquisition de données est de capturer ou mesurer les données physiques à partir de l'objet cible. C'est un instrument transformant une grandeur physique en une grandeur quantifiable. Il est possible d'envisager plusieurs dispositifs sur un même capteur, comme TELOS B (Crossbow) qui mesure l'humidité, la température et la lumière.

### Module de traitement (Processeur)

L'unité de traitement est le contrôleur principal du capteur sans fil. Elle acquiert les informations en provenance du module d'acquisition et les envoie à l'unité de communication. Elle comprend un processeur associé à une unité de stockage limitée.

Elle fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation (par exemple, TinyOS). Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du Sink, et ce par l'agrégation des données reçues des autres capteurs. La technique d'agrégation des données réduit la consommation d'énergie, ce qui prolonge la durée de vie du réseau.

### **Module de stockage (Mémoire)**

L'unité de traitement est généralement associée à des unités de stockage de type RAM, ROM ou flash. Le choix de ces mémoires (taille et type) varie selon la plateforme utilisée et le type d'application du capteur. Le module inclut la mémoire de programme (instruction exécutées par le processeur) et la mémoire de données (pour conserver les données fournies par le module d'acquisition et des autres données locales). Cette mémoire consomme la majeure partie de l'énergie allouée au module de traitement (Holger & Andreas, 2005), raison pour laquelle on lui adjoint souvent de la mémoire flash moins coûteuse en énergie.

### **Module de communication**

Le module de communication est responsable de la connexion du capteur au réseau afin qu'il puisse communiquer avec les autres nœuds via un médium sans fil. Il est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication radio. La portée d'une transmission d'un capteur sans fil peut aller de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres selon la technologie utilisée. La portée d'une transmission est liée à plusieurs facteurs comme l'efficacité des antennes, les conditions météorologiques, les obstacles, les interférences, etc.

### **Module d'énergie (Batterie)**

Un capteur est muni d'une source d'énergie, généralement une batterie, pour alimenter tous ses composants. Les batteries utilisées peuvent être rechargeables ou non. Pour cela l'énergie est une ressource très précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et donc sur tout le réseau.

### II.2.4. Mode de transmission de données

On peut distinguer plusieurs méthodes pour la transmission des informations d'un réseau de capteurs, citons:

#### **La transmission périodique**

Les capteurs prennent périodiquement un échantillon de l'environnement et le transmettent au Sink. La durée de la période est définie selon la nature de l'application et varie de quelques millisecondes à des jours.

#### **La transmission évènementielle**

La transmission des données n'aura lieu qu'à l'occurrence d'un phénomène particulier dans la zone de couverture. Nous citons des exemples tels que la surveillance des feux dans les forêts, où un capteur envoie des alarmes dès que la température dépasse un certain seuil, la détection d'un tremblement de terre ou encore la surveillance de la qualité de l'air dans une région donnée. Chaque capteur doit comparer la donnée mesurée à une valeur seuil donnée. Dès dépassement de cette valeur seuil, le capteur envoie la donnée au Sink.

#### **La transmission basée sur les requêtes**

Ce type de transmission est utilisé pour évaluer un phénomène physique à la demande. En effet, quand les capteurs reçoivent une requête de service, ils prennent un échantillon de l'environnement et le transmettent au Sink. Par exemple, dans une application de télésurveillance médicale, le médecin envoie une requête pour demander l'état actuel des signes vitaux d'un patient.

#### **La transmission hybride**

Ce mode de transmission résulte de deux ou plusieurs des types précédents. Comme exemple, nous trouvons, l'application de télésurveillance médicale qui peut utiliser tous les types à la fois. Ainsi les capteurs envoient d'une façon périodique l'état des fonctions vitales du patient. Si entre-temps un problème est détecté, un événement est transmis

au professionnel de santé. Ce dernier peut en conséquence envoyer une requête pour vérifier l'état du patient.

### II.3. Caractéristiques des WSNs

Les réseaux de capteurs sans fil présentent les caractéristiques intrinsèques aux capteurs (énergie, portée de transmission, puissance de stockage et de traitement) et du réseau formé par ces capteurs (bande passante, densité, déploiement et topologie dynamique). Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit.

**Contrainte d'énergie:** l'énergie représente la contrainte la plus importante dans la majorité des applications à base de WSN. Chaque capteur fonctionne avec une batterie. Dans la plupart des cas, le remplacement de la batterie est impossible. La conséquence directe est que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. C'est pour cette raison que beaucoup de travaux de recherche se sont focalisés principalement sur les moyens de réduire cette consommation. L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes: la détection, le traitement et la communication.

**Modèle de communication:** les capteurs dans les WSNs communiquent selon un paradigme plusieurs-à-un (many-to-one). En effet, les capteurs collectent des informations à partir de leur environnement et les envoient toutes vers un seul nœud qui représente le centre de traitement. La communication entre deux capteurs ne peut avoir lieu que si la distance qui les sépare n'est pas trop importante (quelques dizaines de mètres en pratique). Plus cette distance est grande, plus le coût énergétique est élevé.

**Puissance de stockage et de traitement:** la puissance de stockage et de traitement est relativement faible. Par exemple, un capteur TelosB fabriqué par Crossbow est composé d'un microcontrôleur de 8 MHz avec 10ko de RAM et 48ko de mémoire flash. Il utilise la norme IEEE 802.15.4/ZigBee.

**Bandé passante:** la bande passante utilisée dans les réseaux de capteurs sans fil est généralement réduite. TelosB utilise la bande de fréquence allant de 2400 MHz à 2483.5

MHz avec un débit binaire de 250 kbps. Cette propriété exige que les échanges de messages contrôle (overhead) destinés au bon fonctionnement des protocoles de communication soient limités au maximum.

**Déploiement:** les capteurs peuvent être déployés d'une manière aléatoire ou déterministe. Dans la méthode aléatoire, les capteurs sont éparpillés (langués par des avions par exemple) sur le champ de capture. Dans les méthodes déterministes, les capteurs sont placés de manière individuelle à des endroits bien précis dans le champ de capture.

**Topologie dynamique:** la topologie du réseau de capteur sans fil est fréquemment changeante pour différentes situations. Les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire, ce qui change la topologie du réseau. L'arrêt de fonctionnement d'un capteur suite à une défaillance ou un épuisement de la réserve énergétique change la topologie du réseau. De même, l'ajout de nouveaux capteurs au réseau peut aussi remettre en cause la topologie du réseau.

**Densité:** la surveillance d'un phénomène peut nécessiter le déploiement d'un nombre important de capteurs. Le terme "réseaux denses" est utilisé pour désigner les réseaux comportant un grand nombre de capteurs dans une petite zone. La densité élevée génère une quantité des données importante, susceptible d'augmenter les collisions et les interférences. La transmission d'une quantité élevée des données épuise l'énergie des capteurs. Selon (Nirupama, Deborah, Lewis, & John, 2001), la densité du réseau ( $\mu$ ) peut être calculée comme suit :

$$\mu = \frac{(N\pi R_c^2)}{A} \quad (\text{II.1})$$

Où  $N$  est le nombre de capteurs dans une zone de superficie  $A$ , et  $R_c$  est le rayon de communication.

**Absence d'infrastructure:** les WSNs se caractérisent par l'absence d'infrastructure préexistante. Les capteurs sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue.

**Auto-organisation du réseau:** ceci peut être nécessaire dans plusieurs cas. Par exemple, un réseau comportant un grand nombre de capteurs placés dans des endroits hostiles où la configuration manuelle n'est pas faisable, doit être capable de s'auto-organiser. Un autre cas est celui où un capteur est inséré ou retiré (à cause d'un manque d'énergie ou de destruction physique), ainsi le réseau doit être capable de se reconfigurer pour continuer ses tâches.

**Sécurité physique limitée:** les WSNs sont plus vulnérables aux problèmes de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées est minimisé. Cela étant, le réseau doit permettre la détection des intrusions pour assurer un fonctionnement correct contre les mauvaises manipulation ou attaques. Par conséquent, le contrôle d'accès et la confidentialité doit être garanti. Cependant en fonction du type l'application, la sécurité peut être plus ou moins critique.

### II.4. Comparaison entre WSNs et réseaux sans fil traditionnels

Le WSN est constitué des capteurs possédant des sources d'énergie irremplaçable à cause de leur utilisation parfois dans de milieux hostiles. De l'autre côté, dans un réseau sans fil traditionnel les batteries des unités mobiles utilisées peuvent être facilement remplacées. Par conséquence, une différence majeure entre les WSNs et d'autres réseaux traditionnels concerne l'importance de la gestion de l'énergie. Dans ces réseaux, les chercheurs ont concentré plus leurs efforts sur les facteurs de qualité de service, tel que le débit de transmission et le délai de bout en bout. Par contre, dans les WSNs, l'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance de premier ordre, qui influence directement sur la durée de vie du réseau en entier. Par conséquence, les autres métriques de performance, telles que la durée de transmission et le débit peuvent être légèrement sacrifiées au détriment du facteur de consommation d'énergie.

Par ailleurs, un WSN est conçu pour accomplir un objectif ciblé où les capteurs collaborent pour remplir cet objectif contrairement au réseau sans fil traditionnel où chaque nœud a son propre objectif.

Les communications dans les WSNs se distinguent aussi par le fait qu'elles soient principalement unidirectionnels : à partir des capteurs vers le Sink.

Enfin, une caractéristique unique des WSNs est que des données rassemblées par des capteurs adjacents et quelques lectures consécutives captées par des capteurs présentent généralement de fortes corrélations, ce qui ouvre la voie à d'importants gains en volume de données à travers l'utilisation de techniques de compression ou d'élimination de redondances.

### II.5. Types des réseaux de capteurs sans fil

Selon (Pardeep & Vinay, 2015), cinq types de réseaux de capteurs sans fil sont définis en fonction de l'endroit et de la manière avec laquelle les capteurs sont installés pour assurer la surveillance. Selon ces propriétés de déploiement des capteurs, les WSNs sont classés dans cinq types de base, à savoir : terrestres, souterrains, aquatiques, multimédia et mobiles.

#### Les WSNs terrestres

Les WSNs terrestres sont généralement constitués d'un nombre important des capteurs sans fil déployés de façon aléatoire dans un champ de capture donné. Dans le déploiement ad hoc, les capteurs peuvent être déposés à partir d'un avion et placés aléatoirement dans le champ de capture. Les capteurs doivent être en mesure de communiquer efficacement les données à la station de base.

Bien que la source d'énergie des capteurs soit limitée et ne pas être remplaçable ou rechargeable à nouveau, les capteurs terrestres peuvent être équipés d'une source d'énergie secondaire, comme la batterie ou de la cellule solaire. Mais en dépit de cette possibilité, il est toujours important pour les capteurs d'économiser l'énergie. Pour les WSNs terrestres, l'énergie peut être conservée avec un court rayon de transmission, routage multi-saut et l'agrégation des données dans le réseau.

Les WSNs terrestres peuvent être utilisés dans différentes applications. (Ankita, 2014) a cité les applications suivantes: militaires, surveillance de l'environnement, sécurité, médicales et industrielles.

### **Les WSNs souterrains**

Les WSNs souterrains sont une collection d'un certain nombre de capteurs placés à l'intérieur de la terre, dans une grotte ou dans une mine. Ils sont utilisés pour surveiller les événements souterrains tels que les conditions volcaniques etc. Un Sink supplémentaire est situé au dessus de la terre pour transmettre des informations entre les capteurs et la station de base. Ce type de WSNs est beaucoup plus cher qu'un WSN terrestre en termes de déploiement, d'équipement et de maintenance. Les capteurs souterrains sont plus chers parce que les pièces d'équipement nécessaires doivent être sélectionnées pour assurer une communication fiable à travers les roches, la terre, l'eau, et autres contenus résidant à l'intérieur de la terre. Les conditions d'environnement interne rendent la communication sans fil un défi en raison des niveaux élevés d'atténuation et de pertes du signal.

Contrairement aux WSNs terrestres, le déploiement d'un WSN souterrain nécessite une planification minutieuse et des considérations énergétiques et économiques. L'énergie est une contrainte importante dans les WSNs souterrains. Comme un WSN terrestre, les capteurs souterrains sont équipés d'une source d'énergie limitée (batterie). Une fois déployé, il est difficile de recharger ou remplacer la batterie.

Les WSNs souterrains peuvent être utilisés dans différentes applications, telles que : le tremblement de terre et les glissements de terrain, la surveillance de l'environnement, l'entretien des infrastructures et l'entretien des terrains de sport.

### **Les WSNs aquatiques**

Les WSNs aquatiques se composent d'un certain nombre de capteurs et de véhicules déployés à l'intérieur de l'eau. Les capteurs aquatiques sont très coûteux, donc peu de capteurs sont déployés dans la région de surveillance. Des véhicules autonomes sous-marins sont utilisés pour l'exploration ou la collecte des données des capteurs.

Par rapport à un déploiement dense de capteurs dans un WSN terrestre, le déploiement dispersé des capteurs est utilisé au niveau de la mer. Les communications sans fil aquatiques sont mises en œuvre par la transmission d'ondes acoustiques. (Mohsin, Sheikh, Manzoor, Felemban, & Qaisar, 2015) présentent les différents types des WSNs aquatiques.

Les WSNs aquatiques peuvent être utilisés dans différentes applications, telles que : la surveillance de la pollution ou la surveillance et le contrôle des ressources maritimes.

### **Les WSNs multimédia**

Les WSNs multimédia sont la combinaison d'un certain nombre de capteurs à faible coût équipés de micros et de caméras. Ces capteurs sont reliés entre eux par une connexion sans fil pour la détection et le traitement des données. Les WSNs multimédia sont utilisés pour permettre la surveillance et le suivi des événements sous la forme d'applications multimédia. Ce type de réseau nécessite au préalable un placement optimal des capteurs multimédia dans l'environnement. En effet, les applications des réseaux de capteurs multimédia tout comme certaines autres nécessitent un placement des capteurs qui permet une couverture optimale du champ de capture.

Les WSNs multimédia peuvent être utilisés dans différentes applications, telles que : la surveillance du trafic routier, la surveillance des frontières et la détection d'intrusion.

### **Les WSNs mobiles**

Les WSNs mobiles sont un ensemble de capteurs mobiles. Les capteurs mobiles ont la capacité de détecter, calculer et communiquer comme les capteurs non-mobiles. Les WSNs mobiles sont utilisés dans les applications militaires et industrielles.

Les WSNs mobiles peuvent être utilisés dans différentes applications, telles que la surveillance des animaux. Dans ce dernier cas, on rattache des capteurs aux animaux afin de suivre leurs mouvements pour les schémas de migration, les habitudes alimentaires ou d'autres fins de recherche. Les capteurs peuvent également être fixés à

des véhicules aériens sans pilote pour la cartographie de la surveillance ou de l'environnement.

### **II.6. Domaines d'application**

La miniaturisation, l'adaptabilité et la communication sans fil permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications. Les WSNs peuvent être constitués de différents types de capteurs capables de surveiller une variété de paramètres, tels que, la température, l'humidité, la pression, le mouvement des véhicules, le niveau de bruit, la présence ou l'absence d'objets, etc.

Parmi les domaines d'application où la technologie des réseaux de capteurs est la plus avancée, nous pouvons citer :

#### **Applications militaires**

Les réseaux de capteurs ont été initialement développés pour des applications militaires. Les WSNs peuvent constituer des modules intégraux dans les systèmes militaires de commandes pour le contrôle des équipements, la communication de données, ou encore la surveillance des forces ennemis. Un autre objectif d'importance majeure est la détection d'attaques par des armes nucléaires ou chimiques.

#### **Applications médicales**

Avec la réduction régulière de la taille des capteurs, l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil dans le cadre de la récolte d'informations de biométrie d'une population est devenue envisageable. Certaines applications proposent déjà des réseaux de capteurs sans fil fonctionnant à l'intérieur du corps humain dans un but de traitement de maladies ou de contrôle (mesure de la glycémie ou du taux de cholestérol, détection de cancers, etc.). Leur utilisation permet d'obtenir des diagnostics plus précis et un meilleur suivi médical de certaines infections ou maladies (Belmonte, 2011). Les WSNs permettent la surveillance des patients par la télésurveillance des signes vitaux et des niveaux d'activité à domicile des personnes handicapées. La surveillance à distance permet une intervention rapide en cas de nécessité.

Le suivi de l'emplacement et le mouvement des patients et des médecins à l'intérieur de l'hôpital est désormais possible par les WSNs.

### Applications environnementales

Dans le domaine environnemental, il existe de nombreuses applications possibles pour les réseaux de capteurs sans fil. Une des principales applications est la surveillance et la préservation des milieux biologiques et des écosystèmes, comme le climat, la détection précoce de catastrophes naturelles comme les incendies et les inondations, ou encore le suivi et l'enregistrement des mouvements de petits animaux, les oiseaux et les insectes dans les forêts.

### Applications agricoles

Les réseaux de capteurs sans fil sont largement utilisés dans le domaine de l'agriculture de précision pour assurer le contrôle de la température, l'humidité (air, sol, feuille), la vitesse du vent ou l'ensoleillement. Il est possible aussi de les utiliser pour le contrôle de l'arrosage.

### Applications domestiques

Dans ce domaine, les WSNs permettent de mieux gérer et d'économiser les ressources (l'électricité, l'éclairage, la climatisation, le chauffage, etc.) d'un foyer ou d'un immeuble (Belmonte, 2011). Les WSNs sont très utiles pour détecter un mouvement ou une activité, pour ensuite transmettre des informations pour activer ou désactiver l'équipement domestique adéquat (comme la lumière).

Grâce aux avancées technologiques, des capteurs intelligents peuvent être intégrés dans les appareils électroménagers tel que les aspirateurs, fours micro-ondes ou réfrigérateurs. Ces capteurs peuvent interagir entre eux ainsi qu'avec les réseaux externes via Internet pour permettre à l'utilisateur de contrôler plus aisément ces appareils d'une façon distante.

### Applications commerciales

Au sein de ce domaine d'application, de plus en plus de compagnies développent et proposent des méthodes et solutions basées sur des réseaux de capteurs sans fil intégrant des puces RFID. Parmi les applications proposées, on peut citer: le contrôle environnemental dans les usines et les bureaux, la surveillance des flux de matières des chaînes de production, la surveillance de la qualité des produits et le suivi des véhicules et détection des encombres.

### Applications de sécurité

Grâce aux réseaux de capteurs sans fil, il est possible de concevoir de nouvelles applications pour la surveillance de l'intégrité ainsi que le bon fonctionnement des structures des bâtiments, des barrages, des routes, des voies ferrées, des bateaux, des véhicules terrestres ou aériens, et la détection d'intrusions. Ces applications permettent de réduire les coûts de la sécurisation et la protection de telles installations.

## II.7. Les Standards de communication des WSNs

Un standard définit les fonctions et les protocoles nécessaires pour que les capteurs puissent interagir avec divers réseaux. Parmi les standards les plus importants actuellement, citons IEEE 802.15.4, ZigBee, 6LoWPAN, IEEE 802.15.3, Wibree.

### II.7.1. IEEE 802.15.4

Ce standard (IEEE, 2011) a été conçu pour répondre aux besoins des réseaux locaux sans fil à faible débit. Il met l'accent sur le faible coût de déploiement, la faible complexité et la faible consommation d'énergie. Les dispositifs IEEE 802.15.4 sont proposés pour fonctionner dans la bande industrielle, scientifique et médicale (ISM) de 2,4 GHz.

Dans la topologie en étoile, la communication est effectuée entre les dispositifs du réseau et un seul contrôleur central. La topologie pair à pair permet de mettre en place des réseaux plus complexes; par exemple, réseaux ad hoc et auto-configurables. IEEE 802.15.4 assure des débits différents selon la bande de fréquences utilisée : 250 kbit/s à

2,4 GHz, 40 kbit/s à 915 MHz( en Amérique) et 20 kbit/s à 868 MHz (Europe) (Sarammal & Roseline, 2013).

### **II.7.2. ZIGBEE**

Zigbee est un standard pour des capteurs évolutifs et consommant peu de puissance. Il produit et géré par une alliance de même nom. Le standard prévoient des vitesses de transmission allant jusqu'à 250 kbps sur une plage de 10 à 100 m et utilisent la bande de fréquence 2,4 GHz. Une réseau Zigbee peut être configuré en topologie étoile, mesh (maillée) ou pair à pair (Deepika & Rajapirian, 2016). Les protocoles de communication ont été conçus de manière à faire fonctionner les nœuds pendant des périodes prolongées (de l'ordre d'une ou plusieurs années sur une seule batterie). Zigbee constitue donc une alternative moins coûteuse à la technologie Bluetooth pour des applications de détection et de contrôle sans fil (Sarammal & Roseline, 2013).

### **II.7.3. 6LoWPAN**

L'Internet des objets «Internet of Things» est basé sur le protocole IPv6. 6LoWPAN est un acronyme de IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks. Le concept 6LoWPAN est issu de l'idée que «le protocole Internet pourrait et devrait être appliqué même aux plus petits objets» (Sarammal & Roseline, 2013) et que les objets de faible puissance avec des capacités de traitement limitées devraient pouvoir participer à l'Internet des objets. Le groupe 6LoWPAN a défini des mécanismes d'encapsulation et de compression d'en-tête qui permettent aux paquets IPv6 d'être envoyés et reçus de réseaux basés sur IEEE 802.15.4

### **II.7.4. IEEE 802.15.3**

IEEE 802.15.3 est une norme émergente pour les réseaux sans fil personnels à haut débit, spécifiquement pour le support de flux multimédia de haute qualité. Il utilise une fréquence 2,4 GHz et est capable d'atteindre un débit de données maximum de 55 Mb/s. La couche IEEE 802.15.3 MAC offre un support adapté aux applications en temps réel. La norme est utilisée dans des appareils tels que les haut-parleurs sans fil, les accessoires

sans fil pour les jeux, les téléphones sans fil, les imprimantes et les téléviseurs (Sarammal & Roseline, 2013).

### **II.7.5. Wibree**

Wibree est une nouvelle technologie radio interopérable pour les petits appareils. Elle peut être intégré à des produits tels que des montres, des claviers sans fil, des jeux et des capteurs de sport, qui peuvent ensuite se connecter à des appareils hôtes tels que les téléphones mobiles et les ordinateurs personnels. Wibree est principalement conçu pour des applications où la consommation d'énergie est ultra faible et la petite taille et le faible coût sont les exigences essentielles.

L'un des aspects les plus importants de Wibree est qu'il prévoit des puces dual-mode qui peuvent prendre en charge à la fois Bluetooth et Wibree. Les deux modes sont destinés aux téléphones portables, aux ordinateurs multimédia et aux PC. Wibree fonctionne en 2.4 GHz ISM avec un débit de 1 Mbit/s sur une distance de 5 à 10m (Ramya, Devika, & Lakshmi, 2014). La couche de liaison Wibree fournit un mode de fonctionnement ultra faible puissance, une simple découverte de périphérique et un transfert de données fiable de point à multipoint avec une conservation d'énergie et des fonctionnalités de cryptage (Sarammal & Roseline, 2013).

## **II.8. Les défis des WSNs**

### **II.8.1. Le déploiement des capteurs**

Un réseau de capteurs est souvent composé d'un nombre important de capteurs qui sont, soit placés à un endroit précis ou bien dispersées aléatoirement. Différents modes de déploiement sont envisageables et dépendent essentiellement de l'application de surveillance et de l'environnement.

### Déploiement déterministe

Lorsque l'environnement est accessible, il est possible de placer précisément les capteurs sur le champ de capture suivant un plan prédéfini. On parle alors de déploiement déterministe. Ce mode de placement optimise le nombre de capteurs utilisés.

### Déploiement aléatoire

L'utilisation des capteurs dans des zones inaccessibles ou sensibles rend impossible un déploiement déterministe. Les capteurs peuvent alors être déployés à l'aide de moyens divers. Il a souvent été question d'un déploiement aléatoire des capteurs, effectué comme un jeté de graines.

#### II.8.2. La topologie

Les caractéristiques de déploiement aléatoire, fonctionnement autonome et fréquence élevé de pannes rendent la maintenance de la topologie d'un réseau de capteurs une tâche complexe. En effet, le nombre important de capteurs, qui sont déployés avec une densité élevée, exige une bonne gestion de la maintenance de la topologie du réseau déployé. Nous examinons, dans ce qui suit, les différents problèmes liés aux topologies des réseaux de capteurs et leurs changements.

#### Phase de pré-déploiement et de déploiement

Les capteurs peuvent être éparpillés sur le champ de capture en masse ou placés d'une manière individuelle par le biais de plusieurs moyens, comme les jeter d'un avion, roquette, ou les placer capteur par capteur d'une façon manuelle ou en utilisant des robots.

Le nombre important de capteurs utilisés dans un réseau de capteurs empêche leur déploiement suivant un plan soigneusement établi. Cependant, un schéma général pour le déploiement initial doit être conçu pour réduire les coûts d'installation, augmenter la flexibilité d'arrangement des capteurs, et faciliter l'auto-organisation des capteurs et leur tolérance aux pannes.

### **Phase de post-déploiement**

Après la phase de déploiement, la topologie du réseau peut subir des changements dus aux changements de position des capteurs, de l'accessibilité à cause du brouillage ou des obstacles en mouvements, de l'épuisement d'énergie, ou du mauvais fonctionnement des capteurs.

Bien que les capteurs puissent être déployés d'une manière statique, la panne matérielle constitue un évènement très commun à cause de l'épuisement d'énergie ou la destruction. Il est possible également d'avoir un réseau avec des capteurs qui ont une mobilité très élevée. Par conséquent, la topologie du réseau de capteurs est exposée fréquemment aux changements après la phase de déploiement.

### **Phase de redéploiement des nouveaux capteurs**

Des capteurs additionnels peuvent être installés pour remplacer ceux qui sont en panne ou bien pour répondre aux besoins des tâches assignées au réseau. Cette addition entraîne la réorganisation du réseau et le changement de sa topologie.

Une bonne gestion du réseau faisant face au facteur de changement fréquent de la topologie d'un réseau ad hoc, caractérisé par une contrainte exigeante de consommation d'énergie, doit passer obligatoirement par la conception des protocoles de routages spécifiques.

#### **II.8.3. La couverture**

Un autre facteur important du déploiement d'un WSN, est la capacité de capture. Les capteurs déployés, doivent assurer une couverture complète des évènements qui se produisent dans l'espace de déploiement en vue d'assurer la fiabilité du réseau.

##### **II.8.3.1. Zone de couverture**

Les capteurs fonctionnent avec un modèle à seuil, c'est à dire qu'un capteur possède deux zones : une zone de perception et une zone de communication. Pour schématiser,

nous considérons que ces zones sont représentées par deux cercles qui ont pour centre le capteur comme le montre la Figure II.3 :

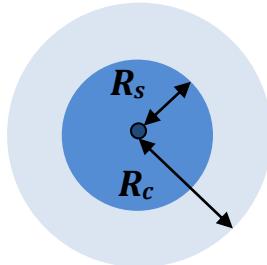


Figure II.3. Zone de couverture

Avec :  $R_s$  rayon de couverture et  $R_c$  rayon de communication.

### II.8.3.2. Modèles de couverture

La couverture assurée par un réseau de capteurs peut être assimilée à la qualité de service du réseau. Il existe plusieurs manières de définir cette couverture, en fonction de l'application attribuée au WSN. En effet, on peut souhaiter une couverture globale d'une zone à observer ou encore n'exiger que l'observation d'un nombre défini de cibles. Dans tous les cas, la couverture est un objectif primordial dans les réseaux de capteurs et est souvent soit à maximiser, soit exprimée sous la forme de contraintes afin d'assurer une couverture totale.

Il y a plusieurs facteurs qui doivent être considérés en développant un plan pour la couverture dans des réseaux de capteurs. Beaucoup de ces derniers dépendront de la particularité de l'application. Typiquement, on surveille un champ entier, un ensemble de cibles, ou on veut détecter une intrusion (Raymond & Ammari, 2010).

**Couverture entière et la couverture partielle** : la couverture d'un champ entier, autrement connue sous le nom de couverture complète, signifie que chaque point dans le champ de capture est dans le rayon de couverture d'un capteur au minimum.

Dans la couverture absolue, chaque point dans le champ de capture doit être couvert par un capteur au minimum sans laisser n'importe quelle zone non couverte. Dans certains cas, par exemple la température et la pression, la couverture partielle peut être

considérée comme une couverture totale parce que dans ces cas-ci la lecture à un point est semblable aux abords (Ponmuthuramalingam & Preethi, 2015).

**Couverture de cible** : est l'observation d'un nombre fixe de cibles. Ce type de couverture est souvent utilisé dans des applications militaires. (Purnima & Kumar, 2012) proposent un protocole pour la gestion de couverture de cibles dans le but de réduire au minimum la consommation d'énergie.

**Détection d'intrusion** : est la détection du mouvement à travers une barrière de capteurs.

### II.8.4. La k-couverture

La couverture du champ est entière lorsque tout point dans le champ de capture est couvert par un ou plusieurs capteurs. Lorsque tout point dans le champ de capture est couvert par un et un seul capteur où tout point se trouve dans la zone de couverture d'un seul capteur. Dans ce cas on parle de la 1-couverture. En outre, un champ est dit k-couvert si tout point peut être surveillé par au moins  $k$  capteurs actifs (Gallais, Carle, & Simplot-Ryl, 2007).

Le problème de la k-couverture concerne le recouvrement d'une région par  $k$  capteurs, où  $k \geq 1$ . Une région est appelée k-couverte si elle se trouve dans le rayon de couverture d'au moins  $k$  capteurs différents.

La couverture du champ de capture peut prendre plusieurs formes suivant la nature des applications. Par exemple, dans les applications les moins sensibles telles que la surveillance des champs agricoles, nous pouvons concevoir des protocoles de couverture, tels que chaque point dans le champ de capture soit surveillé par un seul capteur. Cependant, dans les applications sensibles telles que les applications militaires ou liées à la sécurité, il est nécessaire d'assurer la couverture de chaque point dans le champ de capture par plus d'un capteur pour garantir la tolérance aux fautes.

Different applications des WSNs comme la détection des incendies, la détection des radiations et la détection d'intrusion peut nécessiter une k-couverture en temps réel. Ça

aide pour concevoir un réseau avec une tolérance aux pannes robuste. De plus,  $k$  capteurs redondants peuvent assurer la fiabilité des données reçues.

Les problèmes de  $k$ -couverture ont été abordés dans différents travaux recherches sous différentes contraintes. (Kai, Xiaofei, Limei, & Xuan, 2013) et (Jiguo, Ying, Liran, Baogui, & Xiuzhen, 2016) considèrent le problème de  $k$ -couverture dans les réseaux de capteurs hétérogènes. Les auteurs dans (Ammari & Das, 2012) traitent le problème de la  $k$ -couverture par la notion des clusters.

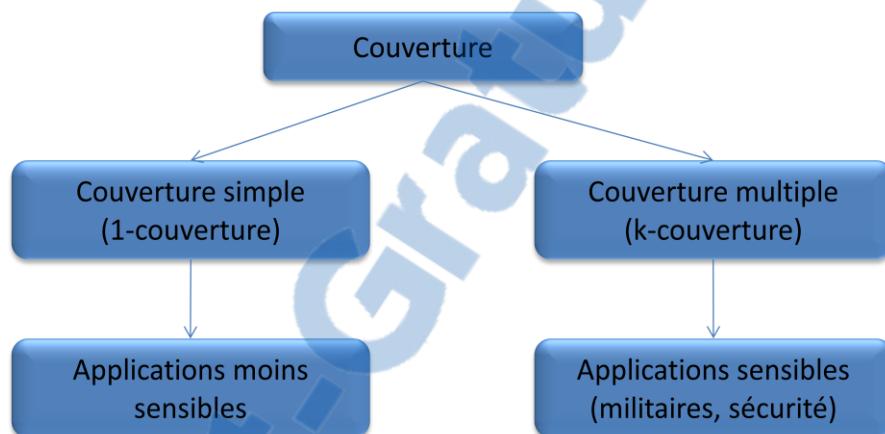


Figure II.4. Types de couverture

### II.8.4.1. Métriques de qualité de service de la couverture

Le problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil est une question fondamentale. La couverture du réseau reflète la perception de la qualité du service offerte par le réseau. Deux métriques ont été définies par (Filippou, Karras, & Papademetriou, 2009) :

#### A. Pourcentage de la zone non couverte dans le champ de capture

Cette métrique est définie comme le pourcentage de zone non couverte par n'importe quel capteur à un moment donné sur le champ de capture tout entier. Une fois tracé, elle donne une évaluation de combien de temps le réseau peut réaliser des niveaux acceptables de couverture.

### B. Temps où la première brèche se produit

Une mesure de qualité évidente est pour combien de temps où la totalité du périmètre étant détectée soit maintenue. A partir d'un certain nombre de capteurs sont morts, une brèche se produit et le réseau de capteurs échoue à accomplir ses fonctions correctement.

#### II.8.5. La connectivité

La connectivité est une autre métrique de performance importante dans les WSNs. Elle représente une condition suffisante pour la transmission fiable d'information.

La connectivité peut être définie comme la capacité du nœud capteur d'atteindre le lien de transmission de données. Chaque capteur a un rayon de communication qui définit la zone dans quelle un autre capteur peut être placé afin de recevoir des données. Le capteur dans un réseau peut recueillir l'information d'une région d'observation et transmettre cette information à la station de base (Hirani & Singh, 2015). Le souci de la connectivité du réseau est de garantir que chaque capteur peut trouver un itinéraire vers le Sink.

Dans un modèle de transmission en disque, chaque capteur a un rayon de communication  $R_c$ , et deux capteurs quelconques peuvent communiquer l'un avec l'autre si et seulement si la distance euclidienne entre eux est inférieure ou égale au  $R_c$ . Deux capteurs sont directement connectés s'ils peuvent transmettre et recevoir les données de l'un à l'autre directement. Deux capteurs peuvent également être connectés par des transmissions multi-saut à travers quelques autres nœuds servant de *relais*.

En raison d'énergie limitée, un capteur peut transmettre l'information à une distance courte. Une transmission de longue distance est possible seulement via le transfert d'information saut-par-saut. Un réseau connecté s'assure que les données mesurées de n'importe quel capteur peuvent être transmises au Sink, probablement par l'intermédiaire de transmissions multi-saut.

### La k-connectivité

La k-connectivité est définie comme la propriété que le réseau reste connecté malgré la défaillance de n'importe quel  $k-1$  capteurs (Zhao, Yağan, & Gligor, 2013). Chaque capteur est connecté à au moins  $k$  autres capteurs. La k-connectivité fournit une sécurité de communication contre un adversaire capable de détruire jusqu'à  $k-1$  liens. En outre, la k-connectivité améliore la résistance face à la déconnexion du réseau à cause de l'épuisement de la batterie. Pour assurer la tolérance de fautes, la k-connectivité est souhaitable. (Suneet, Pratyay, & Prasant, 2016) proposent une approche offrant une k-couverture à toutes les cibles ainsi qu'une m-connectivité.

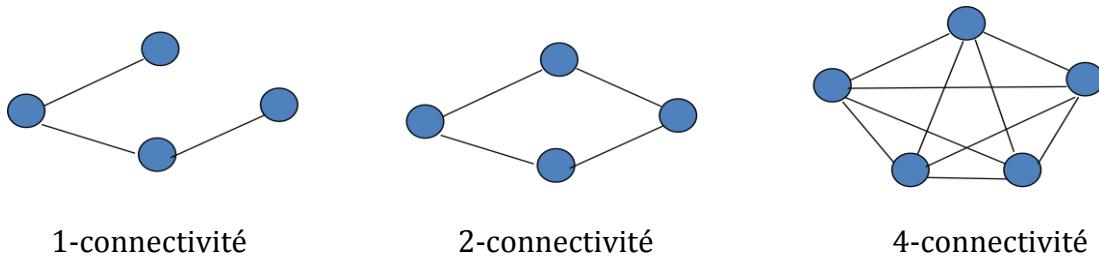


Figure II.5. k-connectivité

#### II.8.6. L'énergie dans les réseaux de capteurs

Les capteurs sans fil sont des éléments disposant d'une alimentation autonome. Leur durée de vie est limitée par la durée de vie de leur batterie. Cette contrainte forte a une influence majeure sur l'ensemble des techniques, mises en place pour le déploiement de tels réseaux. Il est donc primordial d'effectuer un déploiement qui étend la durée de vie du réseau.

L'énergie est la contrainte la plus importante dans un capteur. Généralement, les capteurs sont déployés dans des environnements hostiles. Par conséquent, aller recharger les capteurs en énergie ou remplacer leurs batteries est souvent une opération complexe et coûteuse. Par exemple, déployer des capteurs dans le pôle nord pour surveiller le réchauffement climatique est une tâche trop coûteuse si on met sur place un personnel pour changer les batteries de temps à autre. Il est donc important de

comprendre que la durée de vie d'un capteur est relative à l'autonomie de son support d'énergie. Ainsi, toute opération imaginée ou envisagée doit être évaluée en terme de consommation d'énergie.

C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs. La majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent sur ce problème afin de concevoir des algorithmes et protocoles spécifiques à ce genre de réseau qui consomment le minimum d'énergie. En ce qui concerne l'énergie, la consommation d'un capteur peut être influencée par différents facteurs, comme la distance séparant ce capteur des autres pour l'envoi d'information ou le nombre de paquets de données transitant par ce capteur.

Dans un WSN, l'envoi d'information nécessite une énergie non négligeable. Plus le récepteur est loin, plus l'énergie nécessaire pour lui envoyer des informations est importante. Le nombre et la taille des paquets de données influent également sur la consommation du capteur.

### II.8.6.1. Phases de consommation d'énergie

Déetecter les événements dans le champ de capture, élaborer un traitement de données local et transmettre les résultats à l'utilisateur sont les principales tâches d'un capteur sans fil. Les étapes de consommation d'énergie par ce capteur peuvent être, dès lors, divisées en trois phases : la capture, la communication et le traitement de données.

#### Phase de capture

L'énergie consommée au moment de la capture varie suivant la nature de l'application. Une capture sporadique consomme moins d'énergie qu'un contrôle d'événement constant. La complexité de l'événement à détecter joue également un rôle crucial pour déterminer la quantité d'énergie consommée.

#### Phase de communication

Parmi les trois phases citées auparavant, la phase de communication de données est celle qui consomme la plus grande quantité d'énergie, ceci, à cause de la multitude de

composants électroniques intégrés au circuit responsable de cette opération. Cette phase implique les deux étapes d'émission et de réception de données. Il est démontré que pour les communications à courte portée, avec une faible puissance de radiation, les coûts énergétiques pour l'émission et la réception de données sont pratiquement égaux.

Durant cette phase, il est important de considérer l'énergie nécessaire pour la mise en marche du circuit de communication, le temps de démarrage étant égal à plusieurs centaines de microsecondes rend l'énergie consommée durant cette période non négligeable. Par conséquent, une bonne politique de consommation d'énergie doit obligatoirement éviter au maximum le recourt à la mise en marche et l'arrêt fréquents des circuits de communication.

### Phase de traitement de données

Comparé à la phase de communication, l'étape de traitement local des données consomme beaucoup moins d'énergie. En effet, le coût énergétique nécessaire pour transmettre 1KB sur une portée de 100m est approximativement égal à celui nécessaire pour exécuter 3 millions d'instructions à une vitesse de 100 millions d'instructions par seconde. Ce fait favorise largement le traitement local des données pour l'amélioration de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs.

Les capteurs doivent donc posséder des moyens de traitement local de données, tout en restant capable d'interagir avec les capteurs avoisinants.

#### II.8.6.2. La durée de vie d'un réseau de capteurs

La durée de vie est un facteur crucial qui détermine l'efficacité d'un WSN. La durée de vie d'un capteur est une durée de temps où le capteur est dans l'état actif tout le temps (Karine & Mourad, 2013). La durée de vie d'un réseau de capteurs est généralement définie par le temps durant lequel le réseau, est capable de maintenir assez de connectivité, couvrir le champ de capture ou garder à un certain niveau de couverture. Il peut y avoir d'autres définitions de la durée de vie du réseau liées à d'autres paramètres du réseau. La durée de vie d'un WSN est donc liée à la durée de vie des capteurs. La durée de vie d'un capteur dépend principalement de la durée de vie de sa batterie. Cette

dernière dépend des énergies consommées par les différents modules qui composent le capteur, par la technologie de la batterie et la façon de s'en servir (Aina, 2015).

Nous pouvons rencontrer de nombreuses définitions de la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil dans la littérature selon les besoins des applications. Parmi les définitions possibles, nous pouvons citer :

**Définition1 :** *la durée de vie d'un réseau est définie comme l'instant où le réseau commence à fonctionner à l'instant où le critère de couverture désiré n'est plus satisfait* (Manirajan & Sathishkumar, 2015).

**Définition2 :** *la durée de vie d'un réseau est peut être équivalente à la durée pendant laquelle une partie du champ de capture reste couverte par un certain nombre de capteurs* (Divyani, Kanak, Vatika, Rajeshwa, & Kumar, 2015). Par exemple :

- durée pendant laquelle le champ de capture est couvert par au moins  $k$  capteurs,
- l'intervalle complet pendant lequel la probabilité de garantir simultanément une connectivité et une  $k$ -couverture est au moins égale à un seuil  $\alpha$ ,
- durée pendant laquelle chaque cible est couverte par au moins un capteur,
- durée pendant laquelle l'ensemble du champ est couvert par au moins un capteur,
- durée pour laquelle au moins une partie du champ de capture est couverte par au moins un capteur,
- durée de fonctionnement continu du système avant que la couverture ou le taux de paquets reçus tombent en-dessous d'un seuil prédéfini,
- durée jusqu'à la perte de la connectivité ou de la couverture totale.

**Définition3 :** *la durée de vie d'un réseau est définie jusqu'à ce que le premier capteur s'épuise* (Tinker & Chinara, 2015).

**Définition4 :** la durée de vie d'un réseau est le nombre de cycle depuis le début du fonctionnement jusqu'à épuisement du dernier capteur fonctionnel (Divyani, Kanak, Vatika, Rajeshwa, & Kumar, 2015).

**Définition5 :** la durée de vie d'un réseau de capteurs est équivalente à la durée jusqu'à ce qu'un certain nombre de capteurs cessent de fonctionner (Aina, 2015).

Par exemple ? elle est équivalente à :

- la durée jusqu'à ce que le premier capteur épouse toute son énergie,
- la durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie,
- la durée jusqu'à ce que 50% des capteurs épuisent leurs batteries et s'arrêtent de fonctionner,
- la durée jusqu'à ce que le réseau soit partitionné : apparition de la première division du réseau en deux (ou plus). Cela peut correspondre aussi à l'épuisement du premier capteur (si celui-ci tient une position centrale),
- la durée pendant laquelle un pourcentage donné de capteurs possède un chemin vers le Sink.

**Définition6 :** la durée de vie d'un réseau de capteurs est la durée jusqu'à ce que le premier cluster-head épouse toute son énergie (Soro & Heinzelman, 2005).

**Définition7 :** la durée de vie d'un réseau de capteurs est la durée jusqu'à ce que le réseau ne fournisse plus un taux acceptable de détection d'événements (Aina, 2015).

### II.8.6.3. Techniques d'économie d'énergie

La classification ci-dessous traite les différentes techniques d'économie d'énergie soit au niveau du capteur individuellement ou bien sur tout le réseau.

### a. Gestion de la batterie

Dans cette catégorie, les protocoles définissent une distribution uniforme pour la dissipation d'énergie entre les différents capteurs afin de mieux gérer la consommation d'énergie et augmenter ainsi la durée de vie de tout le réseau. En outre, le mécanisme de mise en veille est une technique de gestion de batterie. En effet, les protocoles déterminent des délais de mise en veille des nœuds capteurs inactifs pour une meilleure conservation d'énergie.

### b. Gestion de mobilité

Certains protocoles proposent comme solution la sélection d'un ensemble de capteurs mobiles chargés de se déplacer entre les capteurs et collecter les données captées. Ceci réduira l'énergie consommée au niveau de chaque capteur en éliminant sa tâche de transmission. Un capteur mobile est généralement doté d'une batterie plus importante que celle d'un simple capteur.

### c. Gestion des données

Les protocoles classés dans cette catégorie offrent une meilleure gestion de données et de leur traitement. Deux principales sous-catégories sont déterminées :

- **Agrégation** : l'opération d'agrégation effectue un traitement supplémentaire sur les données brutes captées depuis l'environnement. Un nœud agrégateur combine les données provenant de plusieurs capteurs en une information significative, ce qui réduit considérablement la quantité de données transmises, demande moins d'énergie et augmente ainsi la durée de vie du réseau.
- **Clustering** : une des importantes approches pour traiter la structure d'un réseau de capteurs est le clustering. Il améliore l'utilisation des ressources rares telles que la bande passante et l'énergie. Les protocoles du clustering divisent le réseau en un ensemble de clusters ayant chacun un nœud hôte (cluster head) qui récupère les données depuis tous les capteurs de son cluster puis les achemine

vers le Sink. Cette solution permet de mieux gérer le trafic de réseau et d'alléger la quantité d'information qui circule (Challal, 2016).

### **d. L'ordonnancement des capteurs**

Le déploiement aléatoire exploite un très grand nombre de capteurs pour assurer la couverture et la connectivité du réseau. Par conséquent, plusieurs techniques ont été proposées pour tirer profit de cette redondance dans le but de prolonger la durée de vie du réseau. Il existe donc des capteurs qui observent une même zone dans le champ de capture. Cette redondance est exploitée par l'ordonnancement d'activité.

Ordonner l'activité dans un réseau de capteurs consiste à alterner les charges de façon à épouser les capteurs équitablement. Pendant qu'une partie participe à l'application, les autres sont dans un mode passif, économisant ainsi leur énergie.

### **e. Le contrôle de la puissance de transmission**

Le module de communication est celui qui consomme le plus d'énergie. Par l'application de puissances d'émissions faibles, le capteur peut préserver beaucoup d'énergie.

### **f. Sinks multiples**

La solution de cette catégorie repose sur l'utilisation de plusieurs Sinks dans le même réseau de capteurs pour éviter l'atténuation d'énergie des capteurs qui entourent les entourent. En effet, les Sinks multiples divisent la concentration du trafic dans le réseau ce qui donne un équilibrage de charge (Shobana & Balasubramanian, 2015).

## **II.9. Conclusion**

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures et caractéristiques, leurs diverses applications et les défis dans

ces réseaux. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux. En effet, les WSNs se caractérisent par une capacité énergétique limitée rendant l'optimisation de la consommation d'énergie une tâche critique pour prolonger la durée de vie du réseau. Nous avons présenté les différentes techniques d'économie d'énergie aux différents niveaux.

Les réseaux de capteurs ont fait naître de nombreuses problématiques de recherche à travers les applications qu'ils permettent d'entrevoir et les nombreuses contraintes qu'elles supposent. Nous consacrons le chapitre prochain au problème de déploiement dans les WSNs.

# **Chapitre III**

## **Stratégies de Déploiement des Capteurs dans les WSNs**

### III.1. Introduction

Le déploiement des capteurs est une phase décisive qui influe considérablement sur le fonctionnement et la performance d'un réseau de capteurs sans fil. Dans ce chapitre nous nous intéressons aux problèmes de déploiement dans ces réseaux en présentant les différents concepts et les stratégies adoptées. Dans la première partie du chapitre nous avons présenté les différentes méthodes de déploiement. Nous avons consacré la deuxième partie à la description des approches de solution pour le déploiement des réseaux de capteur sans fil. La troisième partie de ce chapitre est dédiée à la présentation des différentes stratégies de placement des capteurs classées par objectif d'optimisation.

### III.2. Les méthodes de déploiement

Dans les situations où on a une connaissance préalable du champ de capture, les capteurs peuvent être placés de façon déterministe. Tandis que dans d'autres cas, en raison de la grande taille du réseau ou de l'inaccessibilité du champ de capture, le recours à un déploiement aléatoire peut être la seule alternative.

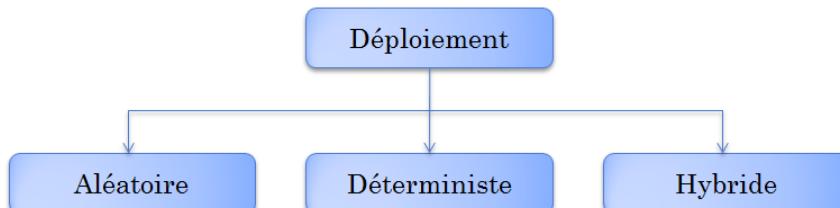


Figure III.1. Les méthodes de déploiement

#### III.2.1. Déploiement aléatoire

Ce type de déploiement est adapté aux environnements hostiles ou lorsque le déploiement déterministe est très risqué ou impossible. Les capteurs peuvent alors être déployés à l'aide de moyens divers comme l'hélicoptère.

Le déploiement aléatoire ne garantit pas la couverture et la connectivité du réseau, donc pour assurer ces contraintes il est nécessaire de déployer un nombre important de capteurs. Cela génère des capteurs redondants dans le champ de capture. Cette

redondance doit être efficacement exploitée en choisissant périodiquement un sous-ensemble de capteurs "actif", et mettre les autres en "veille".

Par ailleurs, le nombre important de capteurs génère une grande quantité de données. Par conséquence, la consommation d'énergie sera plus importante pour acheminer les données. Un trafic élevé sur le réseau provoque d'avantage de collisions et d'occupation de la bande passante.

#### III.2.2. Déploiement déterministe

Le déploiement déterministe est habituellement utilisé pour des applications d'intérieur ou dans des environnements accessibles. Le déploiement contrôlé des capteurs est souvent nécessaire quand les capteurs sont chers ou quand leur fonctionnement est sensiblement affecté par leur position. Le placement déterministe est également très populaire dans les applications acoustiques sous-marine, capteurs d'image et de vidéo.

Dans le déploiement déterministe, les capteurs sont déployés sur un champ, selon un plan prédéfini. Un exemple d'un déploiement déterministe uniforme est un déploiement de capteurs basé sur des grilles où des capteurs sont placés sur les points d'intersection d'une grille (cellulaire).

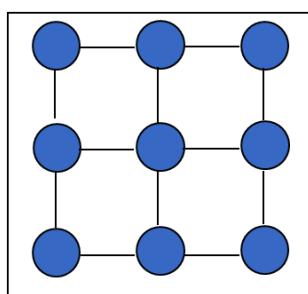
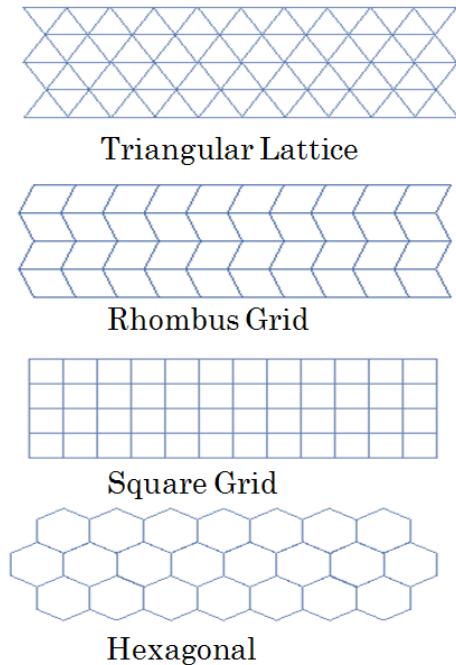


Figure III.2. Déploiement de capteur basé sur des grilles

L'avantage du déploiement déterministe est la couverture totale du champ de capture avec un nombre minimum de capteurs.

### Modèles réguliers de déploiement déterministe

Plusieurs modèles réguliers ont été adoptés pour assurer la couverture du champ. La Figure III.3 illustre 4 alternatives couramment utilisées dans la littérature (Ratna & Laxmipriya, 2015) (Ines, Pascale, Anis, & Saoucene, 2014).



### III.2.3. Déploiement hybride

Dans le déploiement hybride, le champ de capture est divisé en plusieurs zones d'une façon déterministe. Par la suite, les capteurs sont placés aléatoirement dans ces zones (Bhupesh & Sudha, 2014).

## III.3. Objectifs du déploiement

Avant la phase de déploiement, il faut déterminer au préalable les objectifs prévus pour le réseau. Les objectifs sont divisés en deux catégories: primaires et secondaires.

Les objectifs primaires sont la couverture, la connectivité du réseau et la durée de vie du réseau. En plus des objectifs principaux, il est intéressant d'envisager d'autres objectifs secondaires tels que la tolérance aux fautes et l'équilibrage de charge.

Le but du déploiement est de maximiser les objectifs principaux en utilisant la moindre quantité de ressources (*nombre de capteurs*). Pour les applications qui nécessitent un nombre important de capteurs, le coût de déploiement d'un réseau de capteurs sans fil ne peut être négligé. Le coût de déploiement d'un WSN est un paramètre primordial (par exemple dans la conception de réseau dédié à une application du bâtiment intelligent). Ce coût dépend essentiellement du coût d'achat, ainsi que du nombre de capteurs à déployer (Benatia, Louis, Baudry, & Ma, 2014).

Les positions des capteurs affectent de nombreuses métriques de performance du réseau, telles que la consommation d'énergie, le délai et le débit. Une grande distance entre les capteurs affaiblit les liaisons de communications, réduit le débit et augmente la consommation d'énergie.

### III.4. Les approches de solution pour le déploiement des WSNs

Le problème de déploiement dans les WSNs est un axe de recherche très actif où chaque équipe de recherche tente d'aborder un ou plusieurs objectifs en proposant un algorithme de déploiement basé sur une ou plusieurs techniques.

#### III.4.1. Techniques basées sur le diagramme de Voronoï

Voronoï était un mathématicien russe qui a inventé une partition d'un plan composé d'objets en zones où chaque zone est définie comme l'ensemble des points les plus proches d'un objet. Cette partition est appelé *Diagramme de Voronoï*.

##### Construction d'un diagramme de Voronoï

- **A partir de deux points** : la Figure III.4 montre que les points en bleu sont plus proches de A que de B, au contraire des points en rouge. M, le milieu de (AB), est aussi proche de A que de B.

La zone bleue de la Figure III.5 représente les points du carré plus proches de  $A$  que de  $B$ . La zone rouge représente ceux qui sont plus près de  $B$  que de  $A$ . La frontière entre les deux est la médiatrice de  $(AB)$ , soit la perpendiculaire à  $(AB)$  passant par  $M$ .

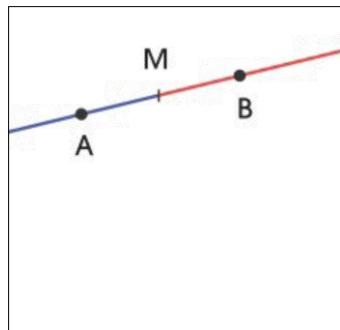


Figure III.4. Le milieu d'un segment

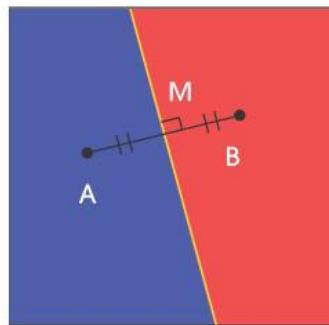


Figure III.5. Construction d'un diagramme de Voronoï de 2 points

#### - **A partir de 3 points :**

Dans la Figure III.6, chaque zone de couleur correspond à un ensemble de points plus près d'un des trois points que des deux autres. Les frontières entre ces zones sont sur les trois médiatrices du triangle  $ABC$ . La Figure III.7, illustre une généralisation de la construction d'un diagramme de Voronoï avec plus de trois points.

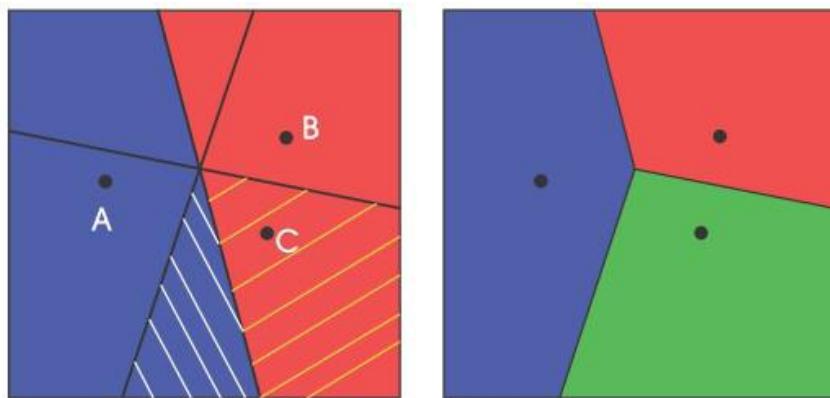


Figure III.6. Construction d'un diagramme de Voronoï de 3 points

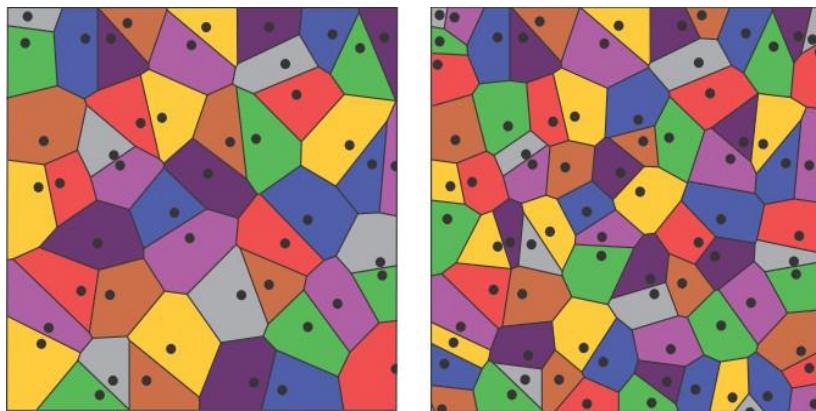


Figure III.7. Construction d'un diagramme de Voronoï de plusieurs points

### Triangulation de Delaunay

Delaunay était un autre mathématicien russe qui a étendu les travaux de Voronoï. La triangulation de Delaunay est un type de partitionnement d'un ensemble de points  $E$  positionnés dans un plan formé de triangles dont les sommets sont des objets. Soit  $S$  un ensemble de  $n$  points, un pavage de Delaunay de  $S$  est obtenu de la manière suivante: deux points de  $S$  sont reliés par une arête s'ils sont dans des régions de Voronoï ayant une arête commune.

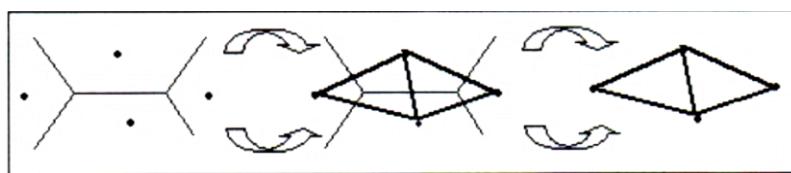


Figure III.8. Les étapes de la triangulation de Delaunay

La triangulation de Delaunay consiste donc à former des triangles dont les sommets sont des points de  $S$  en reliant par des segments de droite les points de  $E$  dont les cellules de Voronoï sont adjacentes. L'ensemble de ces segments constitue la triangulation de Delaunay de  $S$ .

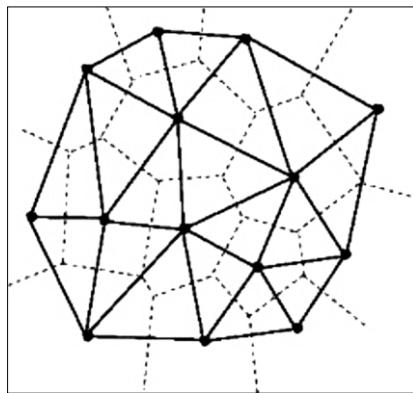


Figure III.9. Triangulation de Delaunay

#### III.4.2. Techniques basées sur la programmation linéaire en nombres entiers

L'objectif principal du problème du déploiement consiste à satisfaire les différentes contraintes liées au WSN tout en minimisant le coût. Le problème considéré revient à donc un problème d'optimisation qui peut être résolu avec la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE). Ces techniques seront détaillées dans le chapitre IV.

#### III.4.3. Techniques basées sur les heuristiques

Dans de nombreux cas, la résolution exacte des problèmes d'optimisation combinatoire nécessite un temps de calcul trop important. En revanche, une bonne (approchée) solution peut être trouvée rapidement en général. On se contente alors souvent d'une telle solution en essayant de faire en sorte qu'elle soit la meilleure possible dans un temps acceptable. Parmi les techniques qui sont utilisées pour obtenir des solutions approchées, parfois appelées sous-optimales, citons :

**Heuristiques** : règles empiriques simples qui ne sont pas basées sur l'analyse scientifique. Elles sont basées sur l'expérience et les résultats déjà obtenus et sur la

ressemblance pour optimiser les recherches suivantes. Généralement, on n'obtient pas la solution optimale mais une solution approchée. Parmi les algorithmes de la méthode heuristique nous citons l'algorithme glouton.

**Algorithme glouton:** le principe de ce type d'algorithme consiste à choisir des solutions locales optimales d'un problème dans le but d'obtenir une solution optimale globale au problème. L'algorithme construit une solution réalisable en se ramenant à une suite de décisions qu'il prend à chaque fois au mieux en fonction d'un critère local sans remettre en question les décisions déjà prises. Généralement, la solution obtenue est approchée.

**Métaheuristiques :** face aux difficultés rencontrées par les heuristiques pour avoir une solution réalisable de bonne qualité pour des problèmes d'optimisation difficiles, les métaheuristiques ont fait leur apparition. Ces algorithmes sont plus complets et complexes qu'une simple heuristique, et permettent généralement d'obtenir une solution de très bonne qualité pour des problèmes issus des domaines de la recherche opérationnelle ou de l'ingénierie dont on ne connaît pas de méthodes efficaces pour les traiter, ou bien quand la résolution du problème nécessite un temps élevé ou une grande mémoire de stockage. Une métaheuristique peut être adaptée pour différents types de problèmes, tandis qu'une heuristique est utilisée à un problème donné. Plusieurs d'entre elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels dans de nombreux domaines tels que : la biologie (algorithmes génétiques), la physique (recuit simulé), ou l'éthologie (algorithmes de colonies de fourmis).

#### III.4.4. Techniques bio inspirées

L'être humain est considérablement inspiré par la nature qui a la capacité de résoudre des problèmes très complexes de sa propre voie distinctive. Les problèmes autour de nous deviennent de plus en plus complexes, et au même exemple notre nature nous guide pour résoudre ces problèmes. La nature donne certaines voies logiques et pertinentes pour trouver la solution à ces problèmes. La nature agit en tant qu'optimiseur pour résoudre les problèmes complexes (Manish, Nikita, & Sanjay, 2015). Dans la nature, plusieurs espèces sont caractérisées par le comportement social. Les nuées d'oiseaux, et les troupeaux d'animaux terrestres, sont le résultat du besoin

biologique qui leur pousse à vivre en groupe. Ce comportement et également l'une des caractéristiques principales des insectes sociaux (abeilles, fourmis...). De ces principes là, les chercheurs se sont inspirés pour développer des méthodes basées sur les comportements de ces animaux.

(Binitha & Siva, 2012) (Cholavendhan, Kumar, & Karnan, 2014) (Mayukh, 2014) présentent différentes techniques bio-inspirées:

- Algorithmes génétiques ;
- Optimisation de colonie de fourmi «Ant Colony Optimization» (ACO) (Dorigo, 1992);
- Algorithme de colonies d'abeilles artificielles «Artificial Bee Colony Algorithm» (ABC) (Karaboga & Basturk, 2007);
- Algorithme d'essaim de poissons «Fish Swarm Algorithm» (FSA) (Li, Shao, & Qian, 2002);
- Algorithme d'optimisation de l'exploration bactérienne «Bacterial Foraging Optimization Algorithm» (BFO);
- Réseaux de neuronaux.

#### **Les algorithmes génétiques**

Les algorithmes génétiques ont été introduits par J. Holland, K. DeJong, D. Goldberg dans les années 70 (Holland, 1973) (Shivakumar & Lakshminath, 2010). À l'origine, ces algorithmes génétiques ont été créés pour comprendre les principes d'adaptation qui interviennent dans la nature, et découvrir un moyen d'intégrer ces principes dans des algorithmes pour les reproduire de façon artificielle. Les problèmes résolus par les algorithmes génétiques sont essentiellement des problèmes d'optimisation.

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation basé sur un processus itératif. Ces algorithmes fournissent des solutions proches de la solution optimale s'appuyant sur des techniques de sélection, de croisement et de mutation.

Le principe d'un algorithme génétique repose sur les étapes suivantes:

1. Création d'une population d'individus initiaux. Chaque individu est représenté par un chromosome qui est constitué d'un ensemble de gènes.
2. Évaluation des individus de la population.
3. La génération d'une nouvelle population par des opérateurs de sélection et de reproduction (mutation et croisement). La population évolue par générations successives en croisant les meilleurs individus sélectionnés entre elles et en les faisant muter, puis en répétant ce procédé un certain nombre de fois afin d'essayer de tendre vers un individu optimal.

#### III.5. Classification des stratégies de déploiement par objectif

Dans cette section, nous présentons les travaux de recherche qui concernent les méthodologies de déploiement des capteurs. Les différentes stratégies de placement des capteurs sont classées par objectif d'optimisation.

##### III.5.1. La couverture

Nous pouvons distinguer différents problèmes de déploiement tels que la couverture des cibles et la couverture d'un champ. Pour chaque type, on peut envisager un déploiement déterministe ou aléatoire.

###### III.5.1.1. Problème de couverture de cibles avec un déploiement déterministe

C'est un problème d'optimisation qui détermine les positions optimales des capteurs en minimisant le coût de déploiement et en satisfaisant la couverture (Bang, 2011).

La modélisation du placement des capteurs est comme suit:

$$\text{Minimize} \sum_{i=1}^P x_i \quad (\text{III.1.1})$$

$$\sum_{i=1}^P \delta_{ib} > 0, \quad b = 1, \dots, B \quad (\text{III.1.2})$$

$$x_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, P \quad (\text{III.1.3})$$

avec  $P$  et  $B$  indiquant les nombre de positions et cibles, respectivement. L'indice  $x_i$  indique si la position  $i$  est occupée et  $\delta_{ib}$  indique si la cible  $b$  est couverte par le capteur placé à la position  $i$ .

La fonction objectif minimise le coût et la contrainte s'assure que toutes les cibles sont couvertes par un capteur au minimum.

Ce problème peut être généralisé en minimisant le coût général, où les capteurs ont différents coûts et possibilités de couverture. La modélisation du problème doit prendre en considération le type de chaque capteur. Ainsi le modèle peut être modifié comme suit:

$$\text{Minimize} \sum_{i=1}^P \sum_{t=1}^T c_t x_i^t \quad (\text{III.2.1})$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{b \in D_t(i)} x_i^t \geq k, i = 1, \dots, P \quad (\text{III.2.2})$$

$$\sum_{t=1}^T x_i^t \leq 1, i = 1, \dots, P \quad (\text{III.2.3})$$

Avec  $T$  représentant le nombre des différents types des capteurs, l'indice  $x_i^t$  indique si un capteur de type  $t$  ( $t=1, \dots, T$ ) est placé à la position  $i$ ,  $c_t$  est le coût du type  $t$ , et  $D_t(i)$  est l'ensemble des cibles qui peuvent être couvertes par un capteur de type  $t$  placé à la position  $i$ .

$$D_t(i) = \{b | d(i, b) \leq R_t\}, i = 1, \dots, P \quad (\text{III.3})$$

Où  $R_t$  est le rayon de couverture du capteur de type  $t$ .

La fonction objectif du programme signifie la minimisation du coût total. La contrainte (III.2.2) assure que toutes les cibles sont couvertes par  $k$  capteurs au minimum. La contrainte (III.2.3) s'assure que chaque position est occupée par un capteur au plus.

Par ailleurs, un problème de couverture de champ peut être transformé en un problème de couverture de cibles. Pour résoudre ce problème, l'approche en grille est souvent utilisée pour se rapprocher à la couverture d'un champ. Si tous les sommets de la grille sont couverts, le champ est considéré comme complètement couvert.

Il existe d'autres variantes de problèmes de placement de capteurs, comme le problème de maximiser le nombre de cibles couvertes en utilisant un nombre donné de capteurs et le problème de minimiser le coût en fixant un taux minimum de couverture.

### III.5.1.2. Problème de couverture de cibles avec déploiement aléatoire

Afin d'assurer la couverture, le déploiement aléatoire utilise un grand nombre de capteurs qui permettent de créer une certaine redondance (cibles couvertes par plus d'un capteur). Il est intéressant de bénéficier de cette redondance des capteurs pour maximiser de la durée de vie et la couverture. L'objectif de la maximisation de durée de vie doit répondre à la question suivante: *Comment diviser les capteurs en différents groupes de capteurs couvrants «cover set» et programmer leurs intervalles d'opération, tels que la condition de couverture est satisfaite et la durée de vie de la couverture peut être maximisée?*

L'objectif du problème de couverture consiste donc trouver les sous ensembles optimaux répondant aux contraintes mentionnées ci-haut (Bang, 2011).

### III.5.1.3. Problèmes de couverture de champ avec déploiement déterministe

La définition du meilleur placement des capteurs assurant la couverture d'un champ donné diffère selon le modèle adopté (Bang, 2011). Différents modèles ont été proposés dans la littérature, nous citons:

### 1. Le modèle de triangle

Il assure la couverture complète et permet 6-connectivité pour  $R_c \geq \sqrt{3}R_s$  ( $R_c$  est le rayon de communication et  $R_s$  est le rayon de capture).

Le nombre minimum de capteurs est évalué dans ce cas à  $\frac{2\sqrt{3}}{9} \times \frac{1}{R_s^2}$

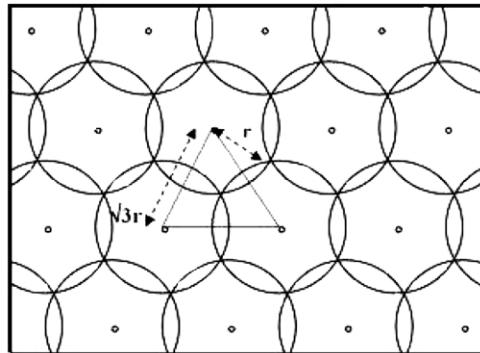


Figure III.10. Le modèle de triangle

### 2. Le modèle de carré

Il assure la couverture complète et la connectivité pour  $R_c \geq \sqrt{2}R_s$

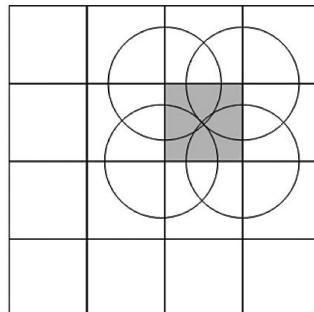


Figure III.11. Le modèle de carré

Le nombre minimum de capteurs est évalué dans ce cas à  $\frac{1}{2} \times \frac{1}{R_s^2}$

### 3. Le modèle d'hexagone

Assure la couverture complète et la connectivité pour  $R_c \geq R_s$

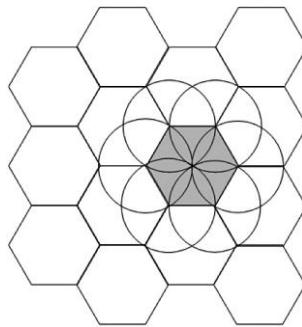


Figure III.12. Le modèle d'hexagone

Le nombre minimum de capteurs est évalué dans ce cas à  $\frac{4\sqrt{3}}{9} \times \frac{1}{R_s^2}$

#### 4. Le modèle de bande horizontale

Il assure la couverture complète et la 1-connectivité pour  $R_c \geq \sqrt{3}R_s$

$$a = \min\{R_c, \sqrt{3}R_s\}$$

$$b = R_s + \sqrt{R_s^2 - a^2/4}$$

Avec,  $a$  la distance entre les capteurs dans la même bande et le  $b$  représente la distance verticale entre les bandes adjacentes.

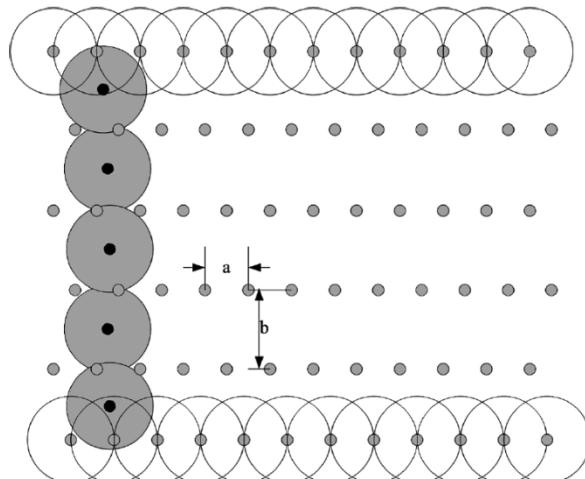


Figure III.13. Le modèle de bande horizontale

#### **III.5.1.4. Autres problèmes de couverture avec déploiement déterministe ou aléatoire**

Le problème de couverture dans les WSNs est largement étudié et différentes approches ont été présentées pour le résoudre.

Afin d'améliorer la précision de la détection de cible dans les réseaux de capteurs sans fil, (Hu & Zhang, 2007) a proposé une approche basée sur l'algorithme génétique pour optimaliser le placement des capteurs. Ainsi que les auteurs dans (Gursharan & Amandeep, 2014) qui ont développé une technique de déploiement basée sur un algorithme génétique qui peut éliminer l'intersection des capteurs hétérogènes et couvre le maximum du champ. Des capteurs sont premièrement déployés dans le champ en utilisant les coordonnées des emplacements possible fournis initialement et alors de nouveaux emplacements finaux sont produits en enlevant les intersections et ainsi la couverture du champ est maximisée. D'autres techniques bio-inspirées ont été utilisées pour résoudre le problème de la couverture. Les auteurs dans (Huan, Qian, Liang, & Yan, 2015) ont proposé une stratégie de déploiement basée sur l'algorithme d'optimisation de «Fruit Fly Optimization Algorithm», afin d'améliorer le taux de couverture. Par ailleurs, d'autres techniques utilisent des capteurs mobiles, qui sont des capteurs placés sur des dispositifs mobiles autonomes. Dans (Erdelj & Razafindralambo, 2012), les auteurs ont présenté une approche distribuée pour la découverte de cibles et la couverture avec des capteurs mobiles. L'emplacement de cibles est inconnu au début du déploiement. Par conséquence, l'approche est divisée en deux phases séparées: découverte et couverture de cibles. Dans le même contexte de mobilité, (De Rainville, 2015) a proposé un système de placement des capteurs mobiles sous contrainte de couverture.

(Nematy & Rahmani, 2013) ont traité le problème de couverture par le diagramme de Voronoi. Après la construction du diagramme, chaque capteur stationnaire est placé dans une cellule. Selon la propriété du diagramme de Voronoi, tous les points dans une cellule sont les plus proches d'un seul capteur qui se trouve dans cette cellule. Par conséquent, si quelques points d'une cellule ne sont pas couverts par leur capteur générateur, ces points ne seront couverts par aucun autre capteur et génèrent des trous

de couverture. Si un capteur couvre tous les sommets de ses cellules, alors il n'y a aucun point non couvert dans sa cellule.

Les auteurs ont présenté une approche de déploiement basée sur le diagramme de Voronoi et les algorithmes génétiques. L'algorithme proposé essaye de déployer des capteurs mobiles supplémentaires en chaque cellule de Voronoi. L'objectif principal de l'utilisation des capteurs mobiles est de rétablir les trous de couverture après le déploiement initial du réseau. L'algorithme génétique est employé pour déterminer les meilleurs endroits pour que des capteurs supplémentaires maximisent la couverture. Le placement optimal des capteurs peut garantir une couverture maximale avec moins de capteurs.

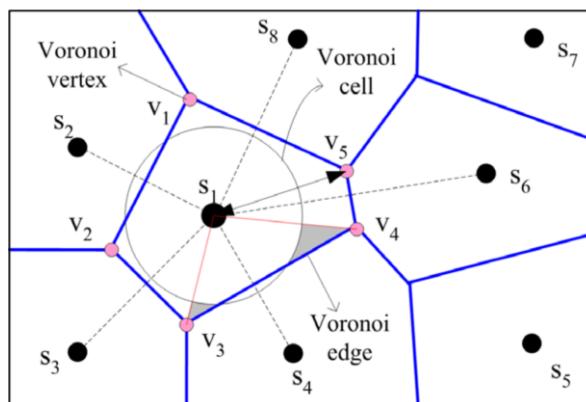


Figure III.14. Les trous de couverture (Nemati & Rahmani, 2013)

Les auteurs dans (Surekha & KalyanRam, 2013), (Abhishek, Sunandita, & Ashraf, 2016) et (Kirankumar, Ayashree, & Mallapur, 2015) ont proposé des approches basées sur la division du champ de capture en des formes géométriques différentes. Dans (Surekha & KalyanRam, 2013), les auteurs ont adopté une méthode de déploiement dans laquelle le champ de capture est divisé dans un premier temps en triangles en utilisant la triangulation de Delaunay. Le déploiement triangulaire des capteurs est appliqué pour chaque triangle. Dans (Abhishek, Sunandita, & Ashraf, 2016) le champ de capture est divisé en structure hexagonale comme c'est montré dans la Figure III.15. Les auteurs cherchent à acquérir une couverture complète dans une zone carrée de 100m×100m et une zone circulaire de rayon 100m qui sont les champs de capture. Les champs de capture sont divisés en dix sous-régions en deux structures à savoir, partitions de

Voronoi aléatoires et des cellules hexagonales concentriques comme c'est montré dans la Figure III.15 . Il ont considéré un rayon de couverture de 5m et 100 capteurs sont déployés dans la région d'intérêt. Les résultats de comparaison entre les deux structures ont démontré que dans le cas de la structure hexagonale, le taux de couverture est plus intéressant que celui de la structure de Voronoï.

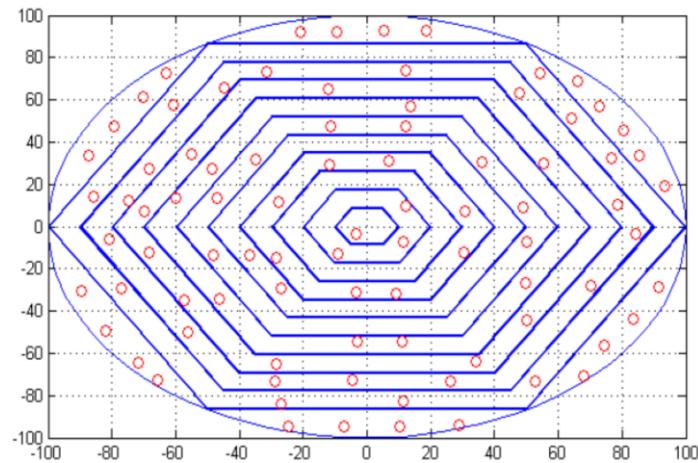


Figure III.15. Déploiement aléatoire de 100 capteurs dans le champ de capture (Abhishek, Sunandita, & Ashraf, 2016)

L'objectif de (Kirankumar, Ayashree, & Mallapur, 2015) est de déployer les capteurs sur un chemin circulaire. L'avantage d'un tel déploiement est que les capteurs trouvent des voisins sur un chemin de trajectoire ou un chemin radial. Le chemin circulaire a plusieurs chemins de trajectoire sur le cercle pour déployer les capteurs.

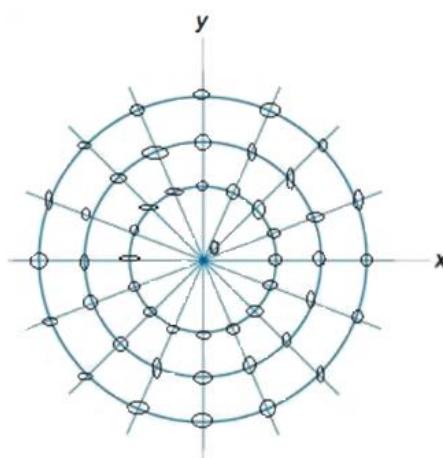


Figure III.16. Déploiement circulaire (Kirankumar, Ayashree, & Mallapur, 2015)

#### **III.5.2.Le coût**

Un critère important à prendre en considération dans le déploiement des WSNs est la minimisation du nombre de capteurs à déployer. En effet, cet objectif présente un intérêt majeur lorsque le prix des capteurs est élevé, comme les capteurs aquatiques notamment. Dans cette section, nous citons quelques approches qui traitent simultanément la couverture et le coût.

L'objectif de certains travaux de recherche est de chercher un déploiement optimal. (Krishnendu, Sitharama, Hairong, & Eungchun, 2002) ont étudié le problème de la minimisation du coût des capteurs déployés en assignant de façon optimale des capteurs aux points d'une grille. Les auteurs ont supposé deux types de capteurs disponibles pour le déploiement, avec différent coûts et rayons. Une solution en programmation linéaire en nombres entiers (ILP) a été présentée pour minimiser le coût de capteurs et la couverture complète. (Moreno-Salinas, Pascoal, & Aranda, 2011) ont proposé un déploiement optimal des capteurs aquatiques sur un plan 3D, pour assurer la couverture d'un ensemble de cibles. L'approche proposée est également basée un ILP. (Xiaochun & Sartaj, 2006) ont proposé une approche basée sur un ILP pour trouver un déploiement avec un coût minimum des capteurs et assurer la couverture des cibles. Les auteurs dans (Chiu & Lin, 2004) ont développé un algorithme pour traiter le problème de placement de capteurs sous les contraintes de coût et de couverture totale des cibles. Ils formulent le problème de placement de capteur comme un problème d'optimisation combinatoire.

(Matthieu, 2014) a abordé des problématiques liées à l'optimisation de déploiement et la localisation de cible dans les réseaux de capteurs. Il a proposé des modèles d'optimisation mono et multi-objectif. Il s'est concentré sur les problématiques de déploiement et de couverture, notamment pour des applications de localisation et de suivi de cible. L'auteur a proposé un modèle pour l'optimisation de deux objectifs : le nombre de capteurs déployés ainsi que la précision de la localisation. Il a cherché à proposer un déploiement de capteurs dans un champ de capture optimisant la précision de la localisation. Il a considéré  $P$ , l'ensemble des positions résultant de la discréétisation d'un champ de capture, et  $|P|$ , le nombre de positions dans le champ de capture. Chaque

position peut accueillir un capteur, et chaque position doit être couverte par au moins un capteur. La modélisation mathématique proposée est comme suit:

$$\text{Minimiser} \sum_{i \in P} x_i \quad (\text{III. 4.1})$$

$$\sum_{i \in P} c_{ij} x_i \geq 1, \forall j \in P \quad (\text{III.4.2})$$

$$x_i \in \{0,1\}, \forall i \in P \quad (\text{III.4.3})$$

Où  $x_i$  est une variable de décision binaire, correspondant à la présence d'un capteur déployé sur la position  $i$ . La contrainte (III.4.2) exprime la nécessité de la couverture de chaque position par au moins un capteur. Le coefficient binaire  $c_{ij}$  exprime la possibilité ou non de la couverture de la position  $j$  par un capteur déployé en  $i$ .

Le deuxième objectif est la précision de la localisation des cibles. L'objectif revient à minimiser la taille de la zone de recherche suite à la détection d'un événement. En partant du fait que le champ contient  $|P|$  positions, il y a au maximum  $|P|$  ensembles de détection, l'ensemble de détection  $S_j$  attribué à une position  $j$  correspondant à l'ensemble des positions en conflit avec  $j$ . L'auteur définit  $N_{jk}$  comme variable binaire représentant l'appartenance de  $j$  et  $k$  au même ensemble de détection.

$$N_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{si } \forall i \in P \text{ tel que } |c_{ij} - c_{ik}| * x_i = 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

La variable  $N_{jk}$  est égale à 1 si tout capteur activé couvrant  $j$  voit également  $k$ .

La difficulté du problème de déploiement de capteur assurant une couverture maximale avec un nombre minimum de capteurs a poussé des chercheurs à s'orienter vers les algorithmes génétiques pour résoudre ce problème en obtenant une solution proche de l'optimale. Les auteurs dans (Zorlu & Ozgur, 2016), ont traité le problème de déploiement sous les contraintes de couverture et de coût de déploiement avec une

approche basée sur un algorithme génétique. L'objectif du problème est de maximiser l'intersection entre la zone de couverture d'un capteur et le champ de capture tout en minimisant l'intersection entre les capteurs pour une couverture maximale du champ. Un chromosome dans l'algorithme génétique est codé sous la forme d'un vecteur représentant une solution. Un gène est la composante principale d'un chromosome, il est formé de nombre réel comme le montré dans la Figure III.17:

$S(x_i, y_i, r_i)$	$S(x_{i+1}, y_{i+1}, r_{i+1})$	.....	$S(x_n, y_n, r_n)$
--------------------	--------------------------------	-------	--------------------

Figure III.17. Structure d'un Chromosome dans le cas de (Zorlu & Ozgur, 2016)

où  $n$  est le nombre des capteurs, et  $(x_i, y_i, r_i)$  les coordonnées et le rayon de couverture d'un capteur  $i$ .

La fonction d'évaluation utilisée dans ce papier est définie comme suit:

$$\sum_{i=1}^n C(s_i, A) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n I(s_i, s_j) \quad (\text{III.6})$$

où  $s$  est un capteur, et  $A$  le champ de capture.  $C(s_i, A)$  est la couverture du capteur d'identifiant  $i$  dans le champ  $A$  et  $I(s_i, s_j)$  définit l'intersection entre les capteurs  $s_i$  et  $s_j$ .

(Banimelhem, Mowafi, & Aljoby, 2013) ont abordé le problème de déploiement dans les réseaux de capteur sans fil hybrides composés de capteurs statiques et de capteurs mobiles. Les auteurs ont proposé une approche qui exploite les déplacements de quelques capteurs mobiles pour éliminer les trous qui seraient formulés après le déploiement aléatoire initial des capteurs statiques. Ils ont présenté un algorithme génétique qui recherche une solution optimale ou proche de l'optimale au problème de trous de couverture. L'algorithme proposé détermine le nombre minimum et les meilleurs emplacements des capteurs mobiles qui doivent être ajoutés après le déploiement initial des capteurs stationnaires. (Senouci, Bouguettouche, Souilah, & Mellouk, 2014) ont proposé un algorithme heuristique déterministe, appelé Max-Cov-Tp, qui peut déterminer le nombre minimum de capteurs et leurs emplacements pour

réaliser une couverture globale du champ de capture. Max-Cov-Tp est un algorithme itératif qui déploie un seul capteur à chaque itération. Il utilise le même principe fondamental de l'algorithme de Min-Miss (Zou & Chakrabarty, 2004), qui exploite le déploiement anticipé pour décider où placer un nouveau capteur. Le processus d'anticipation est matérialisé en simulant le déploiement de capteur dans tous les points candidats et la meilleure position est alors choisie. Cette position est celle qui maximise le nombre de cibles couvertes et réduit ainsi le coût de déploiement.

#### III.5.3. La connectivité

Il est souvent important d'intégrer des contraintes de connectivité à celles de couverture dans les modèles de déploiement de capteurs. En effet, couvrir un champ est inutile s'il n'est pas possible de transmettre les informations recueillies à l'utilisateur.

Parmi les approches qui entament les trois objectifs : couverture, le coût et la connectivité, citons (Boubrima, Bechkit, & Rivano, 2017). Les auteurs ont proposé une approche en programmation linéaire en nombres entiers qui permet de trouver un déploiement optimal à coût minimum pour les WSNs tout en assurant la couverture des sources de pollution et la connectivité du réseau. Ils considèrent en effet un ensemble de positions potentielles où les capteurs peuvent être déployés, ainsi qu'un ensemble de sources de pollution qui doivent être surveillées. Ils cherchent à trouver les positions optimales des capteurs et le Sink de sorte que le coût de déploiement soit minimisé. Chaque source de pollution doit être couverte et les capteurs déployés forment un réseau connecté.

Dans (Huping, Jiajun, & Bang, 2015), les auteures ont étudié le problème de placement de capteurs pour obtenir à la fois la couverture et la connectivité. Au lieu d'utiliser le modèle de couverture d'un simple disque, ils ont utilisé un modèle de couverture appelé «*Confident Information Coverage*» (CIC). L'approche de la grille est appliquée pour discrétiser le champ de capture, l'objectif est de placer un nombre minimum de capteurs pour former un réseau connecté. Deux algorithmes heuristiques ont été proposés, à savoir «*Connected Cover Formation*» (CCF) et «*Cover Formation and Relay Placement with Redundancy Removal*» (CFRP-RR). L'objectif est de trouver les solutions

approximatives pour le problème de la mise en place des capteurs. Les deux algorithmes placent itérativement un nouveau capteur à chaque étape, jusqu'à ce que les conditions de couverture et de connectivité sont être satisfaites.

L'algorithme CCF place un capteur à chaque itération pour former un capteur connecté et couvrant le maximum de points dans la grille. L'algorithme CFRP-RR se compose de trois phases: la première phase vise à obtenir une couverture complète; la deuxième phase vise à atteindre la connectivité et la troisième phase élimine les capteurs redondants. Les résultats montrent que l'algorithme CCF fonctionne légèrement mieux que le CFRP-RR.

La Figure III.18 présente le modèle de couverture en disque de deux capteurs et le modèle de CIC par la collaboration de deux capteurs. Dans cette Figure,  $s_1$  et  $s_2$  sont deux capteurs (les points carrés), et  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  et  $p_4$  sont quatre points de grille (les points circulaires). Les deux disques bleus sont le champ couvert de  $s_1$  et  $s_2$ , respectivement. La zone verte est le champ couvert par la collaboration de  $s_1$  et de  $s_2$ . Grace à la collaboration des capteurs, le modèle CIC étend le modèle couverture en disque.

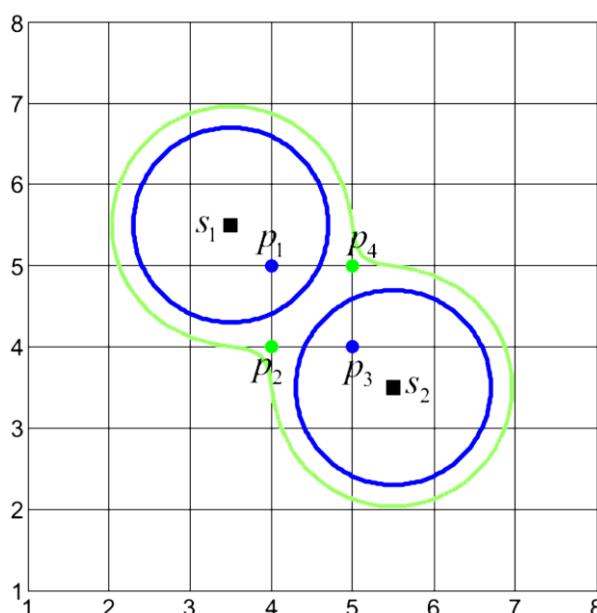


Figure III.18. Illustration du modèle couverture en disque et le modèle de CIC (Huping, Jiajun, & Bang, 2015)

### III.5.4. La durée de vie

Le déploiement des capteurs doit également considérer le critère de conservation d'énergie dans le but de prolonger la durée de vie du réseau en entier. Plusieurs travaux de recherches sont engagés dans le développement des approches de déploiement qui répondent à cette exigence.

Les auteurs dans (Mini, Siba, & Samrat, 2014) ont invoqué le problème de déploiement et du prolongement de la durée de vie dans les WSNs en considérant un ensemble de capteurs qui peuvent être déployés de manière déterministe et un ensemble de cibles à couvrir. La solution proposée se déroule en deux phases : une phase de déploiement et une phase d'ordonnancement. Dans la première phase, l'algorithme de la colonie d'abeilles «Artificial Bee Colony» est utilisée pour calculer des emplacements de déploiement. Dans la deuxième phase, des capteurs sont ordonnés en utilisant une heuristique afin d'assurer la limite supérieure théorique de la durée de vie de réseau. La limite supérieure théorique de la vie est calculée mathématiquement à la fin de la 1<sup>ère</sup> phase. Dans le même cadre de l'application des techniques bio-inspirées à la préservation de l'énergie, (Abidin, Din, & Radzi, 2013) considèrent le problème de la couverture maximale et la réduction de la consommation d'énergie avec une connectivité garantie. Pour cela, deux approches d'optimisation ont été présentées, chacune ayant un seul objectif : *TPSMA-Coverage* avec une fonction objectif qui maximise la couverture, et *TPSMA-Energy* avec une fonction objectif qui minimise la consommation d'énergie. Le placement de capteurs se déroule selon un algorithme inspiré de l'optimisation biologique imitant le comportement des prédateurs territoriaux en marquant leurs territoires avec leurs odeurs, connu aussi sous le nom «Territorial Predator Scent Marking Algorithm» (TPSMA). La connectivité est assurée par l'utilisation de l'algorithme de Dijkstra. Une étude de simulation a été effectuée pour comparer l'algorithme proposé avec différents objectifs simples à un algorithme basé un ILP qui se concentre sur l'optimisation du coût proposé par (Deyab, Baroudi, & Selim, 2011). Les résultats montrent que *TPSMA-Coverage* offre un taux de couverture le plus élevée avec moins de capteurs de par rapport à *TPSMA-Energy* et à l'approche de (Deyab, Baroudi, & Selim, 2011). *TPSMA-Energy* consomme moins d'énergie que les deux

autres. *TPSMA-Coverage* consomme moins d'énergie que l'approche de (Deyab, Baroudi, & Selim, 2011) qui se focalise sur la minimisation du coût de déploiement sans prendre en compte autres critères.

Les auteurs dans (Jiguo, Ying, Liran, Baogui, & Xiuzhen, 2016) se sont concentrés sur le problème de k-couverture de cibles et de connectivité «Connected Target k-Coverage» (CTCk) dans les WSNs hétérogènes. Ils ont élaboré un algorithme centralisé «Centralized Connected Target k-Coverage algorithm» (CCTCk) et un algorithme distribué «Distributed Connected Target k-Coverage algorithm» (DCTCk) afin de générer des ensembles couvrants connectés pour une consommation efficace d'énergie. En outre, ces deux algorithmes s'efforcent de minimiser le nombre total de capteurs actifs. Les auteurs ont supposé que tous les capteurs et les cibles sont déployés aléatoirement et uniformément dans un champ et que les capteurs sont statiques après le déploiement. Le rayon de couverture et de communication des capteurs sont différents.

L'algorithme CCTCk tente de sélectionner le plus petit ensemble de capteurs. Il construit d'abord un ensemble couvrant qui peut fournir une k-couverture pour toutes les cibles. Ensuite, il détermine si chaque capteur dans ensembles de couverture peut communiquer avec le Sink. Si un capteur ne peut pas communiquer directement avec le Sink, il doit trouver un voisin approprié pour relayer les données. De même, un capteur relai peut à son tour avoir besoin de trouver un autre relai vers le Sink.

Par ailleurs, l'algorithme DCTCk produit des ensembles couvrants connectés en considérant la couverture et la connectivité séparément. Il comporte un algorithme de couverture et un algorithme de connectivité. La durée de vie est divisée en rondes de longueur égale, comme le montre la Figure III.19. Une ronde se compose d'une phase initiale et d'une phase de travail. La phase initiale est divisée en une sous-phase de couverture «Sensing Coverage» (SC) et une sous-phase de relais de communication «Communication Relay» (CR).

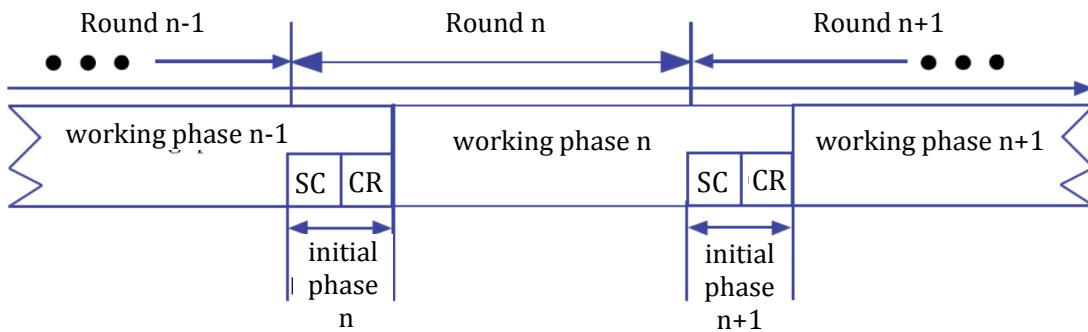


Figure III.19. La durée de vie du réseau (Jiguo, Ying, Liran, Baogui, & Xiuzhen, 2016)

Pendant la SC, chaque capteur détermine s'il doit être en état actif ou état d'attente. Si un capteur devient actif et ne peut pas communiquer avec le Sink, il doit trouver un voisin approprié pour relayer les données détectées et de même pour le capteur relais. Dans cette phase, les capteurs sont activés pour couvrir toutes les cibles. CR est uniquement utilisé pour choisir des capteurs relais, afin de garantir la connectivité réseau. La phase de travail commence à la fin de la phase initiale et se termine avant la phase initiale du tour suivant, de sorte que les cibles peuvent être surveillées en permanence.

Les approches proposées ne traitent pas toutes les contraintes en même temps ce qui dégrade la qualité de la solution. DCTCk produit des ensembles de couvrants connectés en considérant la couverture et la connectivité séparément.

### III.5.5. Discussion

La plupart des travaux cités dans ce chapitre se focalisent sur le positionnement des capteurs sous différentes contraintes, en traitant les objectifs individuellement pour la plupart. Les travaux proposés dans la littérature ont permis de répondre à différentes exigences mais souffrent cependant de certaines limites. Ainsi quelques travaux ont traité le problème de déploiement en considérant un ou deux aspects (e.g., couverture, coût, connectivité, énergie) mais peu de travaux prennent en considération trois aspects à la fois et très rare sont ceux qui en traitent plus. Aussi, la plupart des travaux considère que le nombre de capteurs est fixe et connu dès le départ, donc le coût n'est pas considéré comme une variable d'optimisation. Sans une prise en charge globale des contraintes liées au déploiement d'un WSN, les performances du réseau ne peuvent être totalement optimisées.

### Chapitre III: Stratégies de Déploiement des Capteurs dans les WSNs

---

Nous avons classifié les différentes stratégies de déploiement citées ci-dessus dans le tableau récapitulatif Tableau III.1. Il est clair que sans l'objectif de couverture aucun WSN ne pourra avoir lieu. Tous les travaux cités prennent en considération la couverture, mais chacun la traite différemment. Le deuxième objectif qui est vivement pris en charge par les chercheurs, est le coût de déploiement. Le nombre de capteurs utilisés dans le réseau doit être optimal, en particulier dans le cas des capteurs chers.

Référence	Objectifs				Technique	Type
	Couverture	Connectivité	Energie	Coût		
(Abidin, Din, & Radzi, 2013)	✓	✓	✓		Bio inspiré	Cible
(Abhishek, Sunandita, & Ashraf, 2016)	✓				Heuristique	Zone
(Chiu & Lin, 2004)	✓			✓	LP	Cible
(De Rainville, 2015)	✓			✓	LP, mobilité	Cible
(Deyab, Baroudi, & Selim, 2011)	✓			✓	ILP	Cible
(Erdelj & Razafindralambo, 2012)	✓				Heuristique, mobilité	Cible
(Banimelhem, Mowafi, & Aljoby, 2013)	✓			✓	Génétique, mobilité	Zone
(Boubrima, Bechkit, & Rivano, 2017)	✓	✓		✓	ILP	Cible
(Hu & Zhang, 2007)	✓				Génétique	Cible
(Huan, Qian, Liang, & Yan, 2015)	✓				Bio inspiré	Zone
(Huping, Jiajun, & Bang, 2015)	✓	✓		✓	Heuristique	Zone
(Jiguo, Ying, Liran, Baogui, & Xiuzhen, 2016)	✓	✓	✓		Heuristique	Cible
(Kirankumar, Ayashree, & Mallapur, 2015)	✓				Heuristique	Zone
(Krishnendu, Sitharama, Hairong, & Eungchun, 2002)	✓			✓	Mobilité, ILP	Zone
(Matthieu, 2014)	✓			✓	LP	Cible
(Mini, Siba, & Samrat, 2014)	✓		✓		Bio inspiré	Cible
(Moreno-Salinas, Pascoal, & Aranda, 2011)	✓			✓	LP	Cible
(Nematy & Rahmani, 2013)	✓			✓	Voronoi, génétique, mobilité	Zone
(Senouci, Bouguettouche, Souilah, & Mellouk, 2014)	✓			✓	Heuristique	Zone
(Surekha & KalyanRam, 2013)	✓				Veronoi	Zone
(Xiaochun & Sartaj, 2006)	✓			✓	ILP	Cible
(Zorlu & Ozgur, 2016)	✓			✓	Génétique	Zone

Tableau III.1. Classification des stratégies de déploiement des WSNs

### **III.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le problème de déploiement des capteurs dans un réseau de capteurs sans fil. Nous avons également présenté les travaux de recherche et les différentes stratégies et approches utilisées par la communauté scientifique pour résoudre cette problématique.

Le déploiement des capteurs est un problème critique car il affecte le bon fonctionnement du WSN. Un meilleur déploiement de capteurs doit prendre en considération le coût, la couverture, la connectivité et la durée de vie du réseau. Différentes techniques ont été utilisées dans les travaux de recherche concernant le déploiement, chacune d'elles tente d'améliorer un ou plusieurs objectifs afin d'augmenter la performance du réseau. Cependant, nous considérons que la problématique de déploiement des réseaux de capteurs reste largement ouverte à des améliorations possibles, que ça soit sur le plan de la qualité des solutions ou sur celui de l'efficacité de l'approche de résolution. Ces différents objectifs font l'objet de nos contributions, détaillées dans les chapitres suivants.

# **Chapitre IV**

## **Déploiement Exact et Heuristique des Capteurs dans les WSNs**

## IV.1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil imposent de nombreux problèmes d'optimisation, tels que la couverture, le déploiement des capteurs, le suivi ou la conservation d'énergie. L'objectif principal du problème du déploiement consiste à satisfaire les différentes contraintes liés au WSN tout en minimisation le coût. Ce problème peut être formulé comme un problème d'optimisation qui peut être résolu avec la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE).

À cette fin, nous proposons dans ce chapitre deux approches de déploiement: (*i*) une approche exacte basée sur une formalisation du problème en programme linéaire en nombres entiers (PLNE), (*ii*) une approche basée sur des heuristiques.

La performance et l'efficacité de ces approches en termes de coût du réseau et d'exigences de calcul sont évaluées à travers plusieurs expériences. De plus, nous étudions le problème de la durée de vie du réseau où une certaine durée de fonctionnement doit être atteinte par le renforcement des capteurs déployés.

Nous consacrons la première partie de ce chapitre à la formulation de la programmation linéaire en nombres entiers.

## IV.2. Programmation linéaire en nombres entiers

### IV.2.1. La programmation linéaire

La programmation linéaire est une technique mathématique permettant de déterminer la meilleure solution d'un problème dont les données et les inconnues satisfont à une série d'équations et d'inéquations linéaires. Un Programme Linéaire «Linear Program», noté PL (LP) peut s'écrire de la façon suivante (Pierre, 2013):

$$\text{Maximize} \quad f(x) \tag{IV.1.1}$$

$$f_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \tag{IV.1.2}$$

$$x \in S \tag{IV.1.3}$$

où:

- $S$  est une partie de  $\mathbb{IR}^n$  et  $x$  est un vecteur appelé variables. Ces  $n$  composantes sont les inconnues du problème,
- La fonction  $f: S \rightarrow \mathbb{IR}$  est appelée fonction objectif,
- Les fonctions  $f_i : S \rightarrow \mathbb{IR}$ ,  $i = 1, \dots, m$ , forment des inégalités qui sont appelées les contraintes du problème.
- la fonction objectif  $f$  et toutes les contraintes  $f_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) sont linéaires car elles satisfont les équations suivantes :

$$f_i(\alpha x + \beta y) = \alpha f_i(x) + \beta f_i(y) \quad i = 1, \dots, m, \quad \forall x, y \in \mathbb{IR}^n, \alpha, \beta \in \mathbb{IR} \quad (\text{IV.2})$$

Pour modéliser un problème sous forme d'un modèle linéaire, il est généralement recommandé de procéder à une analyse dont les étapes sont les suivantes :

1. Quelles sont les variables de décision qui sont associées au problème? Une définition soignée des variables peut faciliter la modélisation.
2. Quelles sont les contraintes du problème? On formule les contraintes qui délimitent les valeurs que peuvent prendre les variables.
3. Quelle est la mesure d'efficacité associée aux variables du problème? C'est-à-dire quels sont les coefficients des variables dans la fonction objective ?
4. Les valeurs que peuvent prendre les variables sont-elles entières ou fractionnaires ? Si elles sont fractionnaires on écrit  $x_j \geq 0$ , et si elles sont entières, on écrit  $x_j$  entier et non négatif.

### IV.2.2. La programmation linéaire en nombres entiers

Un problème de Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) «Integer Linear Programming» (ILP) est une programmation linéaire dans laquelle les variables doivent prendre des valeurs entières (Maria, 2011). Si seulement certaines des variables doivent avoir des valeurs en nombre entier, le problème sera appelé «Mixed Integer Linear Programming»(MILP) (Mohammad, 2012).

Un programme linéaire en nombres entiers s'écrit de la façon suivante :

$$\text{Minimize} \quad f(x) \quad (\text{IV.3.1})$$

$$f_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{IV.3.2})$$

$$x \text{ un entier} \quad (\text{IV.3.3})$$

Contrairement au problème en LP, qui peut être résolu efficacement en un nombre limité d'itérations, un problème en PLNE est NP-difficile et le temps de résolution est très important. La résolution de ces problèmes n'est généralement pas aisée pour deux raisons (Delorme, 2000) :

- Ce sont des problèmes NP-difficiles,
- Le domaine des solutions n'est pas convexe.

### IV.2.3. Méthodes de résolution approchée

Dans certaines situations, il est nécessaire de disposer d'une solution de bonne qualité (c'est-à-dire, assez proche de l'optimale) dans un contexte de ressources limitées (temps de calcul et/ou taille mémoire utilisée). Dans ce cas l'optimalité de la solution ne sera pas garantie, ni même l'écart avec la valeur optimale. Cependant, le temps nécessaire pour obtenir cette solution sera beaucoup plus faible.

Typiquement ce type de méthodes, dites heuristiques est particulièrement utile pour les problèmes nécessitant une solution en temps réel (ou très court) ou pour résoudre des problèmes difficiles sur des instances numériques de grande taille.

#### Méthodes de relaxation

Un PLNE est caractérisé par le fait que les variables doivent prendre leurs valeurs dans un domaine discret. Il existe également des programmes linéaires où seulement une partie des variables sont entières et l'autre partie peut prendre des valeurs réelles, dans ce cas, on parle d'un programme linéaire mixte. Considérons le problème (PLNE) de la forme (Maria, 2011):

**Programme en nombres entiers**

$$\text{Minimize} \quad f(x) \quad (\text{IV.4.1})$$

$$f_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{IV.4.2})$$

$$x \in \mathbf{Z}^n \quad (\text{IV.4.3})$$

**Relaxation linéaire**

$$\text{Minimize} \quad f(x) \quad (\text{IV.5.1})$$

$$f_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{IV.5.2})$$

$$x \in \mathbf{IR}^n \quad (\text{IV.5.3})$$

### IV.3. La problématique

Dans la présente étude, nous étudions les problèmes de déploiement dans les WSNs où les conditions de couverture et de connectivité du réseau doivent être satisfaites. Comme solution, nous développons deux approches pour déterminer les positions des capteurs qui assurent ces contraintes. Nous supposons que ces positions sont choisies dans un ensemble discret de positions candidates. La première approche repose sur la programmation linéaire en nombres entiers, qui fournit une stratégie optimale de placement des capteurs mais coûteuse en terme de calcul. La deuxième approche est un algorithme heuristique qui permet de trouver des solutions, pas forcément optimales, en un temps réduit.

De plus, nous nous sommes intéressés à un autre défi majeur dans les WSNs, qui est la conservation d'énergie et la prolongation de la durée de vie. Les WSNs sont constitués de capteurs qui sont essentiellement des dispositifs alimentés avec une batterie. La principale préoccupation est donc de savoir comment réduire la consommation d'énergie tout en offrant un niveau de service similaire. Bien que divers protocoles éco-énergétiques aient été proposés pour prolonger autant que possible la durée de vie du réseau, tel que (Mini, Siba, & Samrat, 2014), (Tinker & Chinara, 2015), (Manirajan & Sathishkumar, 2015), peu de travaux considèrent une durée de vie déterminée à atteindre. Dans cette thèse, notre problème est formulé de manière à garantir que le réseau remplira ses tâches pendant une durée prédéfinie. A cet effet, nous proposons une stratégie économe en énergie basée sur la redondance des capteurs et un ajustement des fréquences de détection des événements par les capteurs.

## IV.4. Les approches de déploiement proposées

Considérons un champ à surveiller à l'aide d'un WSN. Les capteurs sont déployés sur le champ d'une manière déterministe afin que chaque cible puisse être surveillée par au moins un capteur. En outre, le déploiement doit être effectué de manière à ce qu'il existe un chemin de communication vers le Sink pour chaque capteur déployé. Le déploiement doit utiliser un nombre minimum de capteurs. Dans cette section nous décrivons la conception de deux approches.

Dans la première approche, nous proposons un programme linéaire en nombres entiers, nommé «*Exact Deployment under Coverage, Connectivity and Cost*» (ED3C), qui fournit une stratégie de placement optimale des capteurs et définit les liens de transmission entre les capteurs déployés et le Sink.

Comme deuxième approche, nous proposons un algorithme heuristique appelé «*Heuristic Deployment under Coverage, Connectivity and Cost*» (HD3C).

### IV.4.1. L'approche ED3C

Étant donné un ensemble de  $B$  cibles, notées  $B = \{b_1, b_2 \dots, b_n\}$  avec des positions prédéterminées, l'objectif est de trouver un ensemble de positions de capteurs qui les couvrent. Le champ de capture est supposé être une grille carrée. Nous définissons ci-dessous les principaux paramètres:

Paramètre	Signification
$C$	nombre de colonnes dans la grille
$L$	nombre de lignes dans la grille
$R_s$	rayon de couverture des capteurs
$R_c$	rayon de communication des capteurs
$(x_s, y_s)$	les coordonnées du Sink
$R$	le nombre maximal de sauts par chemin

Tableau IV.1. Les paramètres du modèle

En outre, notre modèle offre la possibilité d'ajouter un certain nombre de capteurs de relais, qui ne sont pas responsables de la collecte de données sur les cibles, mais seulement pour assurer la connectivité du réseau si nécessaire.

Les variables de décision de notre modèle d'optimisation sont définies comme suit:

Variable	Signification
$x_{ij}$	un binaire indiquant si un capteur est déployé sur les coordonnées $(i, j)$ de la grille
$y_{ijrb}$	Un binaire indiquant si un capteur relais est déployé sur les coordonnées $(i, j)$ pour la cible $b \in B$ et de rang $r \in \{1, R\}$

Tableau IV.2. Les variables du modèle

Le paramètre  $d(l_{ij}, l_{ah})$  désigne la distance euclidienne entre deux positions possibles  $l_{ij}$  et  $l_{ah}$ .

Soit  $\sigma(l_{ij}, l_b)$  une fonction qui indique si une cible  $b$  peut être couverte par un capteur placé sur la position  $l_{ij}$ , elle est définie comme suit:

$$\sigma(l_{ij}, l_b) = \begin{cases} 1, & \text{si } d(l_{ij}, l_b) \leq R_s \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

Par ailleurs, nous définissons  $\delta(l_{ij}, l_{ah})$ , une fonction qui indique si un capteur déployé sur la position  $l_{ij}$  peut communiquer directement avec un capteur déployé à la position  $l_{ah}$ .

$$\delta(l_{ij}, l_{ah}) = \begin{cases} 1, & \text{si } d(l_{ij}, l_{ah}) \leq R_c \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

Maintenant, notre modèle d'optimisation peut être présenté comme suit:

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{C-1} x_{ij} \\ & \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{C-1} y_{ij1b} \geq 1 \quad \forall b \in B \text{ et } \sigma(l_{ij}, l_b) = 1 \end{aligned} \quad (\text{IV.8.1})$$

$$1 - \sum_{a=0}^{L-1} \sum_{h=0}^{C-1} y_{ah(r+1)b} \leq M * (1 - y_{ijrb}) \quad \forall i \in L, \forall j \in C, \forall r \in \{1, R-1\}, \forall b \in B \\ \text{et } \delta(l_{ij}, l_{ah}) = 1, ((i \neq x_s) \text{ || } (j \neq y_s)) \quad (\text{IV.8.2})$$

$$\sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{C-1} \sum_{r=1}^R y_{ijrb} \geq 1 \quad \forall b \in B \text{ et } \delta(l_{ij}, l_{x_s y_s}) = 1 \quad (\text{IV.8.3})$$

$$x_{ij} \geq y_{ijrb} \quad \forall i \in L, \forall j \in C, \forall r \in \{1, R\}, \forall b \in B \quad (\text{IV.8.4})$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in L, \forall j \in C \quad (\text{IV.8.5})$$

$$y_{ijrb} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in L, \forall j \in C, \forall r \in \{1, R\}, \forall b \in B \quad (\text{IV.8.6})$$

La fonction objectif minimise le nombre total de capteurs déployés. La contrainte (IV.8.1) exige que toutes les cibles soient couvertes par au moins un capteur. La contrainte (IV.8.2) construit le chemin de communication pour chaque capteur couvrant une cible, où  $M$  est un entier suffisamment grand tel que la contrainte est toujours satisfaite. Le premier saut sur le chemin de communication est le capteur qui couvre la cible. Chaque capteur relai est connecté à un autre jusqu'à atteindre le Sink. La contrainte (IV.8.3) assure l'existence d'au moins un capteur relai directement connecté au Sink dans chaque chemin de communication. À la fin de la construction des chemins individuels, la contrainte (IV.8.4), regroupe tous les capteurs déployés dans un même réseau connecté pour optimiser le nombre total des capteurs.

Le modèle linéaire en nombres entiers présenté ci-dessus fournit une solution optimale pour le problème de placement des capteurs, mais le temps de calcul est très élevé pour les grandes instances, car la programmation en nombres entiers est NP-difficile en général (Jirí & Bernd, 2007). En particulier, en fonction du nombre de cibles, le nombre de variables binaires peut être très important. Pour cette raison, nous proposons une approche heuristique qui fournit une solution proche de la solution optimale au problème de déploiement des capteurs, nous appelons cette approche, «*Heuristic Deployment under Coverage, Connectivity and Cost*» (HD3C).

#### IV.4.2. L'approche HD3C

Comme indiqué dans l'Algorithm IV.1 ci-dessous, dans la première étape, nous sélectionnons une cible à couvrir. Dans la deuxième partie, le chemin de communication est construit à partir des capteurs déjà connectés ou du Sink vers la cible sélectionnée. Les étapes principales de l'approche HD3C sont présentées dans la Figure IV.1.

Cet algorithme repose sur un processus itératif, où à chaque itération, nous sélectionnons un emplacement d'un capteur qui couvre un nombre maximal de cibles non couvertes et qui a une distance minimale avec la cible sélectionnée, tout en veillant à ce que la distance entre cet emplacement et le Sink, ou l'un des capteurs déjà déployés, soit inférieur ou égale au rayon de communication. Ce processus est répété pour les cibles restantes jusqu'à ce que toutes les cibles soient couvertes et qu'un réseau connecté soit construit.

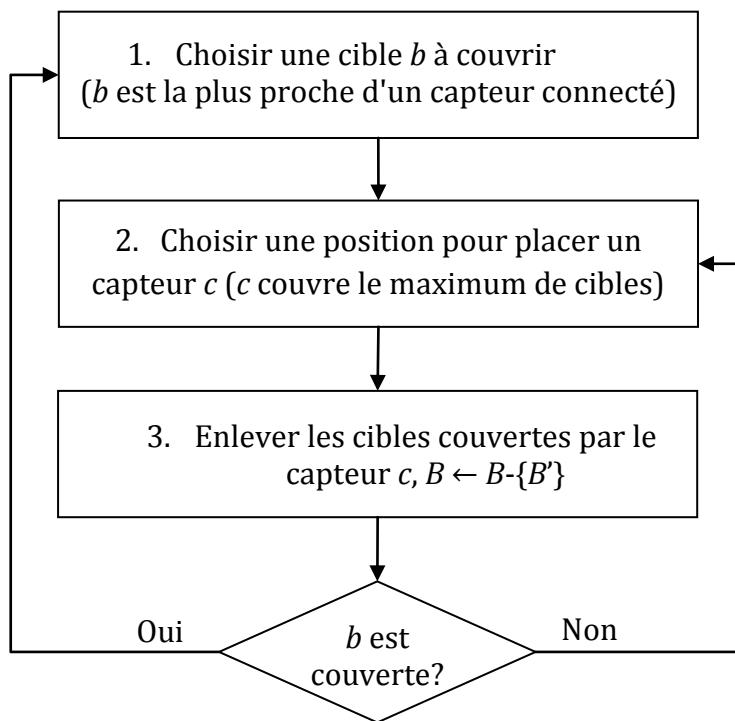


Figure IV.1. Les étapes principales de l'approche HD3C

---

**Algorithme IV.1. HD3C**

---

**Entrées:**

$B \leftarrow \{b_1, \dots, b_n\}$   $\triangleright$  ensemble de cibles non couvertes

**Sorties:**

$NBS$   $\triangleright$  nombre de capteurs déployés

$C \leftarrow \{Sink\}$   $\triangleright$  ensemble de positions des capteurs déployés

**Tantque** ( $B \neq \emptyset$ )

1. Sélectionner  $b \in B$ , avec  $d(l_{ah}, l_b) = \min(d(l_{ah}, l_{b'}))$ ,  $\forall b' \in B$ ,  $\forall l_{ah} \in C$ .

2. **Tantque** ( $\{b\} \cap B \neq \emptyset$ )

    1. Sélectionner une position du capteur  $l_{mn}$  tel que  $\max \sum \sigma(l_{mn}, b')$ ,  $b' \in B$  avec  $d(l_{ij}, l_{mn}) \leq R_c$ ,  $l_{ij} \in C$  et  $l_{mn}$  avec  $d(l_{mn}, l_b) = \min(d(l_{ij}, l_b))$ ,  $l_{ij} \in C$ .

    2.  $B \leftarrow B - \{B'\}$   $\triangleright B' = \{b', \sigma(l_{mn}, l_{b'}) = 1\}$ .

    3.  $C \leftarrow C \cup \{l_{mn}\}$

    4.  $NBS++$

**Fin Tantque**

**Fin Tantque**

---

## IV.5. Maximisation de la durée de vie

Comme discuté précédemment, l'un des défis critiques dans les WSNs est la réduction de la consommation d'énergie car les capteurs sont dotés souvent de batteries non rechargeables. Ainsi, une contrainte capitale dans ces réseaux est de minimiser la consommation d'énergie tout en assurant que le réseau effectue ses tâches dans des meilleures conditions, ce qui permet de maximiser sa durée de vie.

Dans notre travail, la définition de la durée de vie que nous retenons consiste en l'intervalle de temps qui sépare l'instant où le réseau est mis en service de l'instant où l'énergie du premier capteur s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.

Dans cette section, nous proposons une nouvelle approche qui optimise la consommation d'énergie pour prolonger la durée de vie. La principale différence avec la majorité des approches existantes est que celle-ci assure le fonctionnement du réseau pour une durée de vie prédéfinie. Ceci est effectué par le renforcement des capteurs qui

sont incapables de poursuivre leurs tâches pour la période prédéterminée. L'approche proposée est nommée «*Lifetime Enhancement for a Given Duration*» (LEGD).

Nous présentons d'abord le modèle énergétique utilisé, puis nous détaillons l'approche LEGD.

### Le modèle d'énergie

Le modèle énergétique adopté est défini par les équations présentées dans (Heinzelman, Chandrakasan, & Balakrishna, 2000):

L'énergie consommée pour émettre un paquet de  $k$  bits sur une distance  $d$  est donnée par la formule suivante :

$$E_T(k, d) = E_{elec} * k + E_{amp} * k * d^2 \quad (\text{IV.9.1})$$

L'énergie consommée pour recevoir un paquet de  $k$  bits est donnée par la formule suivante:

$$E_R(k) = k * E_{elec} \quad (\text{IV.9.2})$$

Avec:

Paramètre	Signification
$k$	taille d'un paquet
$d$	distance entre l'émetteur et le récepteur
$E_{amp}$	énergie d'amplification
$E_{elec}$	énergie électrique de transmission/réception

Tableau IV.3. Paramètres du modèle d'énergie

Nous remarquons que la transmission est l'opération qui consomme le plus d'énergie à cause du facteur d'amplification.

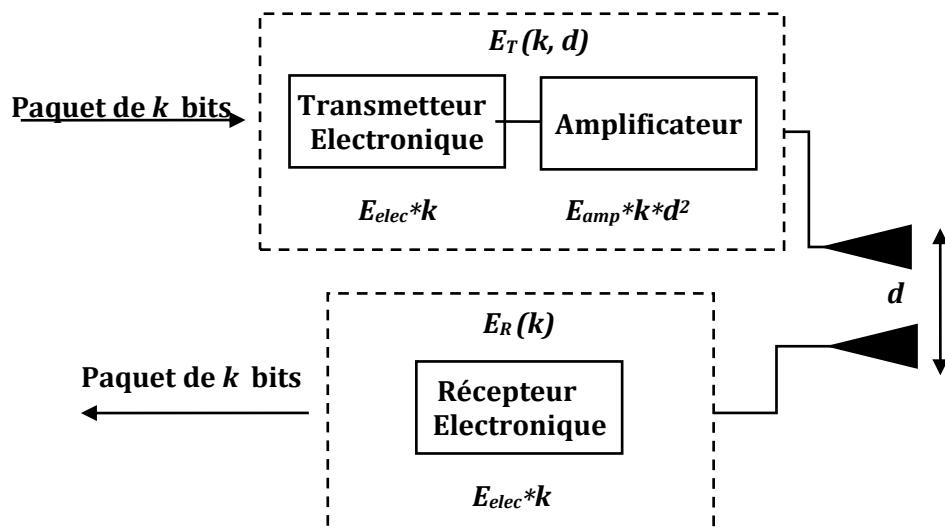


Figure IV.2. Le modèle d'énergie

### Description de l'approche LEGD

De nombreuses applications de réseaux de capteurs peuvent tolérer une certaine dégradation de la fréquence de détection des évènements.

Dans un capteur, l'énergie est consommée en assurant les fonctions suivantes : la capture, le calcul (traitement) et la communication. Plusieurs facteurs interviennent dans ces fonctions : le module radio, la politique d'accès au canal de transmission, le protocole de routage etc.

L'analyse sur les WSNs montre que le module de communication est la partie principale qui consomme la plupart de l'énergie du capteur.

Sur la base de ce concept, nous proposons de réduire l'énergie de communication en réduisant le nombre de transmission de données, ce qui revient à augmenter l'intervalle de détection par un certain pourcentage toléré que l'on note  $\beta$ . L'intervalle de détection est l'intervalle de temps entre chaque capture et la capture suivante.

Nous présentons une approche qui fournit une efficacité énergétique pour prolonger la durée de vie du réseau à une période prédéfinie.

L'idée principale de notre approche est comme suit: les capteurs ne pouvant pas garantir la durée de vie prédefinie sont divisés en deux classes.

La première est l'ensemble des capteurs capable d'assurer cette durée de vie avec une dégradation de la fréquence de détection. La deuxième classe est l'ensemble des capteurs ne pouvant pas assurer cette durée, même avec une dégradation de la fréquence de détection. Cette deuxième classe représente les capteurs qui ont besoin d'une capacité d'énergie importante pour assurer la durée de vie demandée.

La grande partie de la consommation d'énergie des capteurs se produit pendant la communication sans fil, afin de réduire le nombre de transmissions, nous proposons d'utiliser une fréquence de détection inférieure pour les capteurs de la première classe qui réduit le nombre total de transmission de données et par conséquent diminue la consommation d'énergie.

Les capteurs de la deuxième classe doivent être renforcés avec des capteurs redondants afin d'assurer les tâches des capteurs épuisés. Dans cette approche, nous visons à utiliser le nombre minimal de capteurs redondants.

Les étapes de l'approche LEGD proposée sont décrites dans l'Algorithme IV.2. Nous avons considéré un ensemble de capteurs déployés couvrant un ensemble de cibles et formant un réseau connecté au Sink. L'approche LEGD détermine le nombre minimal et les positions des capteurs redondants afin d'atteindre la durée de vie prédefinie. Par ailleurs,

L'approche LEGD détermine une nouvelle valeur de l'intervalle de détection notée *NID* nécessaire pour assurer la durée de vie prédefinie sans dépasser la valeur tolérée.

**Algorithme IV.2. LEGD**

---

**Entrées:**

- $X$   $\triangleright$  ensemble de positions des capteurs
- $T$   $\triangleright$  durée de vie prédéfinie
- $ID$   $\triangleright$  intervalle de détection
- $\beta$   $\triangleright$  pourcentage toléré d'augmentation d'intervalle de détection
- $NBC$   $\triangleright$  nombre total de captures par capteur ( $NBC = T/ID$ )
- $NBD$   $\triangleright$  nombre total de captures dégradées par capteur ( $NBD = T/((ID + ((ID * \beta) / 100)))$ )

**Sorties:**

- $R$ : nombre de capteurs redondants et leur position.
- $NID$ : nouvelle intervalle de détection  $NID \leq ID$ .
- $A$ : ensemble de capteurs qui nécessitent un capteur redondant.
- $D$ : ensemble de capteurs assurant la durée de vie  $T$  avec  $\beta$ .

**Pour**  $i \leftarrow 0$  à  $L-1$  faire

**Pour**  $j \leftarrow 0$  à  $C-1$  faire

$$E_{ij} = \left( \sum_{i'=0}^{L-1} \sum_{j'=0}^{C-1} e_e f_{i'j',ij} + \sum_{i'=0}^{L-1} \sum_{j'=0}^{C-1} (e_e + e_a d_{ij,i'j'}^2) f_{ij,i'j'} \right) * NBC$$

**Si** ( $E_{ij} < E_i$ ) **alors**

$$E_{ij} = \left( \sum_{i'=0}^{L-1} \sum_{j'=0}^{C-1} e_e f_{i'j',ij} + \sum_{i'=0}^{L-1} \sum_{j'=0}^{C-1} (e_e + e_a d_{ij,i'j'}^2) f_{ij,i'j'} \right) * NBD$$

**Si** ( $E_{ij} < E_i$ ) **alors**

$$D \leftarrow x_{ij}$$

**Sinon**  $A \leftarrow x_{ij}$  et  $R=R+1$

**Finsi**

**Finsi**

**Finpour**

**Finpour**

---


$$NID = T/(E_i/E_{max})$$


---

Avec:

$d$ : taille d'un paquet de donnée.

$f_{i'j',ij}$  : quantité du trafic entre le capteur déployé aux coordonnées  $(i,j)$  et le capteur déployé aux coordonnées  $(i',j')$ .

$e_e$ : énergie électrique,  $e_a$  l'énergie d'amplification et  $E_i$  l'énergie initiale d'un capteur.

$E_{max}$ : énergie maximale par capture des capteurs qui ne peuvent pas assurer la durée  $T$ .

## IV.6. Résultats numériques

Dans cette section, nous présentons des résultats numériques et une analyse de la performance des approches proposées. Nous présentons ci-dessous les résultats de performance et la comparaison entre les approches ED3C et HD3C en termes de nombre de capteurs déployés et de temps de calcul.

Nous avons calculé le nombre de capteurs déployés et le temps de calcul avec plusieurs topologies. L'environnement simulé se compose de 5, 10, 15, 20 cibles placées aléatoirement dans une grille de 10x10. Chaque résultat est la moyenne de 5 scénarios différents.

La Figure IV.3 présente le nombre de capteurs déployés sous un nombre différent de cibles. Le nombre de capteurs déployés augmente avec l'augmentation du nombre de cibles. Les résultats montrent que le nombre de cibles affecte le nombre de capteurs déployés.

Bien que ED3C fournit la solution optimale, nous observons que les résultats avec HD3C sont très proches des résultats avec ED3C.

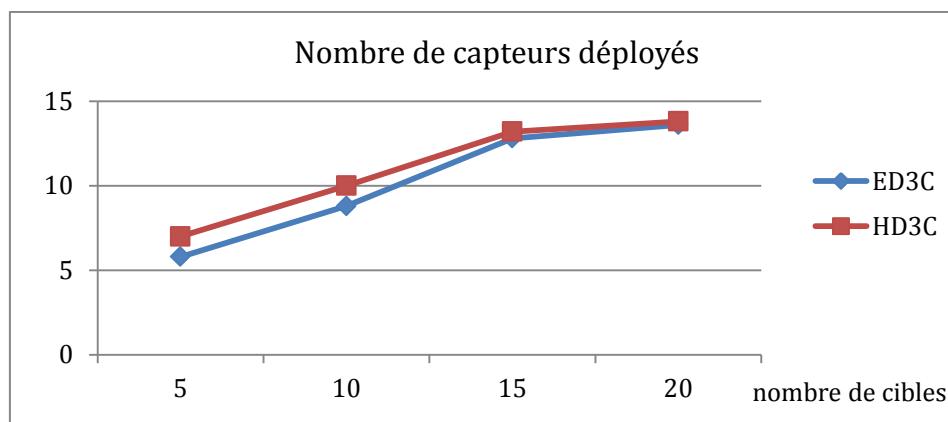


Figure IV.3. Nombre de capteurs déployés

Dans la Figure IV.4, nous comparons le temps de calcul pour avoir une solution dans les approches ED3C et HD3C. Nous observons clairement que l'approche HD3C peut fournir une solution en moins d'une seconde comme spécifié dans le Tableau IV.4. Nous notons

également que le temps de calcul avec l'approche ED3C augmente plus rapidement que celui avec l'approche HD3C avec une densité élevée des cibles.

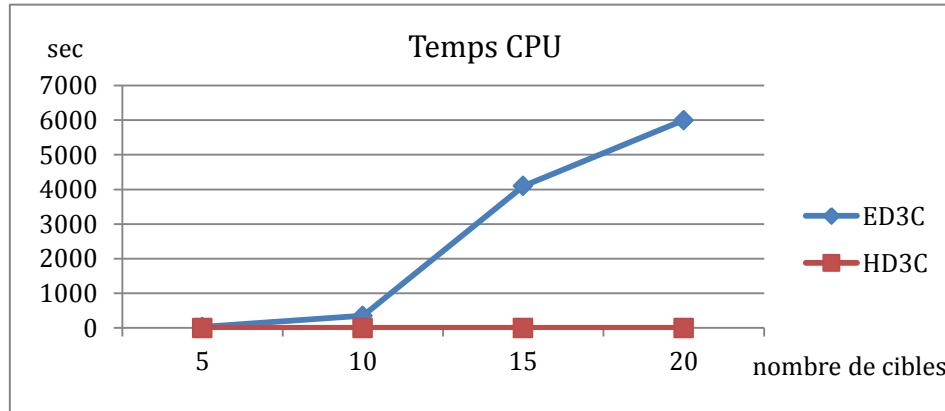


Figure IV.4. Le temps de calcul

# Inst.	Temps CPU (sec.)	
	ED3C	HD3C
5 cibles	27	0,26
10 cibles	351	0,236
15 cibles	4098	0,306
20 cibles	6001	0,344

Tableau IV.4. Le temps de calcul

Dans ce qui suit, nous évaluons la performance de l'approche LEGD, nous avons comparé l'approche proposée avec et sans renforcement des capteurs de grande consommation d'énergie. Le nombre de cibles varie de 5 à 45. Ces cibles sont placées aléatoirement dans une grille de 10x10.

La Figure IV.5 présente la durée de vie du réseau sans renforcement des capteurs. Le résultat est obtenu en mesurant le temps jusqu'à l'épuisement du premier capteur. De cette Figure , nous pouvons voir que le nombre de cibles et leur répartition sur le champ ont un impact important sur la durée de vie du réseau. Une densité de cibles plus élevée génère plus de trafic, nécessitant donc plus de consommation d'énergie pour être transmis jusqu'au Sink. En particulier, les capteurs proches du Sink épuisent leur

énergie plus rapidement, ce qui diminue le pourcentage de la durée de vie globale par rapport à la durée de vie demandée.

La Figure IV.6 illustre le nombre de capteurs épuisés, elle présente l'ensemble des capteurs qui ne peuvent pas assurer la durée de vie demandée sans approche LEGD.

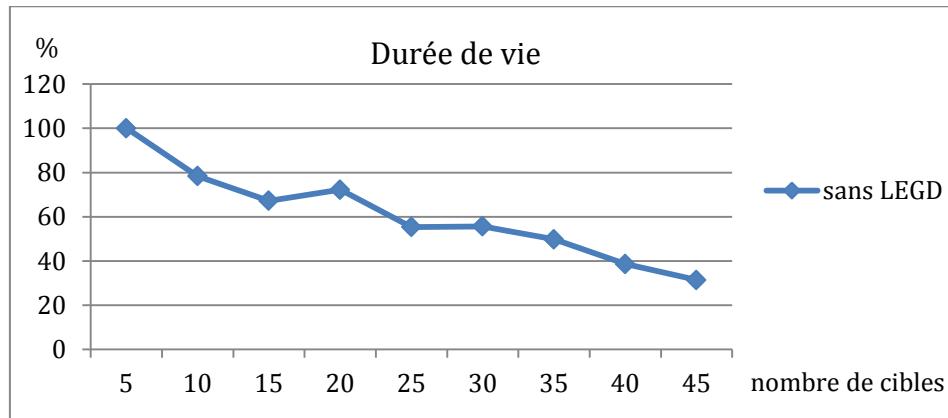


Figure IV.5. La durée de vie

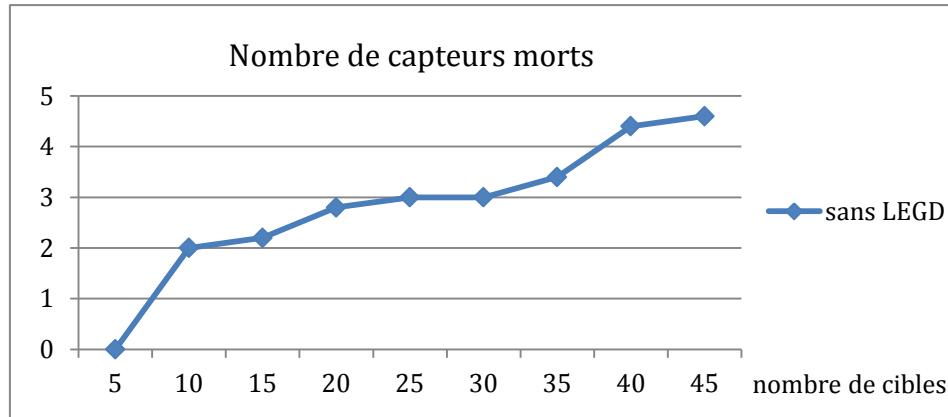


Figure IV.6. Nombre de capteurs morts

Par ailleurs, nous analysons la performance de l'approche LEGD proposée sous différentes valeurs de  $\beta$  pour évaluer le nombre de capteurs redondants. La Figure IV.7 montre l'impact de  $\beta$  sur le nombre de capteurs redondants nécessaires pour assurer la durée de vie pré définie. Nous comparons le nombre de capteurs redondants sous différentes valeurs de  $\beta$  pour différents nombres de cibles.

Comme nous pouvons le constater, l'approche proposée peut améliorer la durée de vie de 55% à 100% en ajoutant 3 capteurs redondants dans le cas de 30 cibles, et de 72% à 100% en ajoutant 2 capteurs redondants dans le cas de 20 cibles.

Nous remarquons que la valeur de  $\beta$  et le nombre de cibles affectent le nombre de capteurs redondants. Nous constatons aussi que le nombre de capteurs redondants diminue lorsque la valeur  $\beta$  augmente. Cela peut être expliqué par le fait qu'une valeur plus élevée de  $\beta$  génère moins de données ce qui réduire le trafic sur le réseau et prolonge la durée de vie. Les capteurs incapables d'atteindre la durée de vie prédéfinie peuvent désormais l'assurer avec une fréquence de détection dégradée.

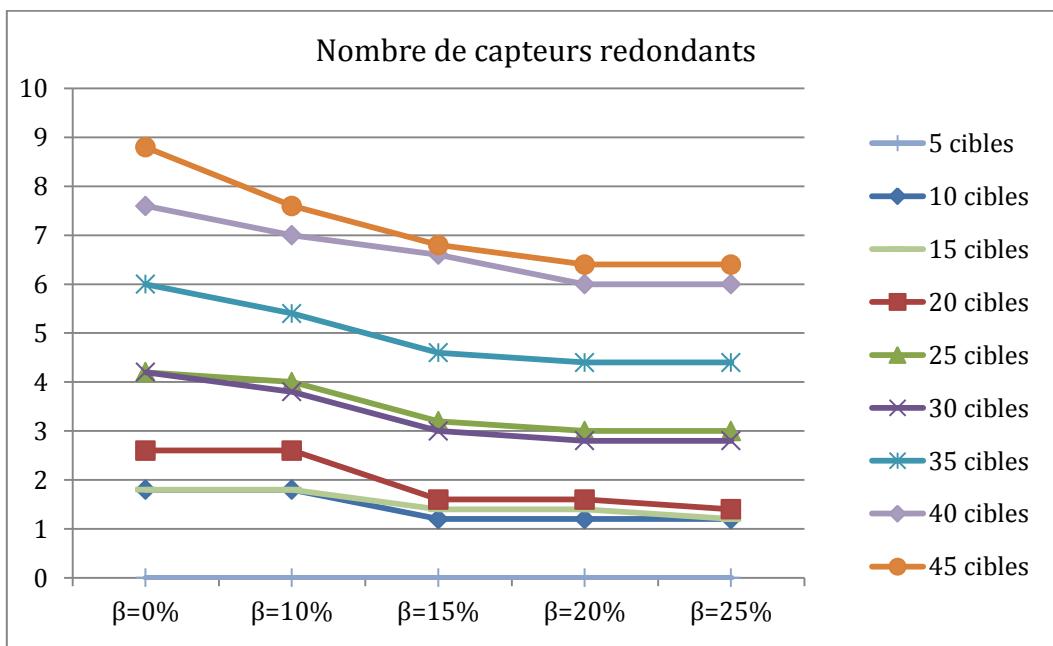


Figure IV.7. Nombre de capteurs redondants

## IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié le problème de déploiement dans le réseau de capteurs sans fil sous différentes contraintes. Nous nous sommes concentrés sur la couverture des cibles et la connectivité du réseau. Nous avons proposé une approche exacte et une approche heuristique dans le but de trouver un nombre minimum de capteurs de telle sorte que chaque cible soit couverte par au moins un capteur et que les

capteurs déployés soient connectés au Sink. Nos approches minimisent le nombre de capteurs ce qui réduit le coût du déploiement du réseau.

Les résultats montrent que les positions des cibles, le nombre de cibles ont un effet important sur le nombre de capteurs déployés. La comparaison de l'approche exacte et heuristique montre une légère différence en termes de nombre de capteurs déployés. L'approche heuristique fournit une stratégie de déploiement presque optimale en très peu de temps, ce qui peut se révéler comme critère primordial dans de nombreuses applications de réseau de capteurs.

Dans cette contribution, nous avons pris en considération une autre contrainte importante dans les WSNs qui est la préservation d'énergie. L'approche LEGD proposée assure une durée de vie prédéfinie avec l'utilisation d'un minimum de capteurs redondants et de la dégradation de la fréquence de détection.

Dans le chapitre suivant, nous avons traité les contraintes de manière différente. En particulier, nous traitons des scénarios où plusieurs objectifs doivent être atteints à la fois.

## **Chapitre V**

# **Déploiement Hybride et Multiobjectif des Capteurs dans les WSNs**

### V.1. Inrtroduction

Dans le chapitre précédent nous avons proposé une approche de déploiement qui traite la contrainte d'énergie indépendamment des autres. Par conséquent, cela a un impact sur la qualité de la solution. Dans ce chapitre nous avons traité le problème différemment de manière à intégrer les contraintes énergétiques dans le processus de déploiement dès le départ. Pour cela, nous avons proposé deux contributions, la première sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) fournit une stratégie de placement optimale des capteurs. La deuxième contribution consiste en une approche mixte (MILP et heuristiques) en se basant sur la technique «fixage séquentiel», qui permet de réduire le temps de résolution de manière drastique. De plus, les approches présentées dans ce chapitre peuvent assurer la couverture d'une cible par plus d'un capteur.

### V.2. Problème de placement optimal de capteur

Nous supposons qu'un ensemble d'objets cibles, noté  $B$ , sont placées de façon arbitraire à l'intérieur d'un champ. Notre premier objectif est de concevoir un ensemble minimal de capteurs avec leurs positions respectives, tels que chaque cible soit surveillée par au moins  $K$  capteurs. Notez qu'une cible peut être surveillée par un certain capteur si la distance euclidienne entre eux ne dépasse pas un rayon de couverture prédéfini  $R_s$ .

Le réseau multi-saut sans fil constitué par ces capteurs doit être entièrement connecté au Sink placé à un certain emplacement  $s$  à l'intérieur du champ. En admettant qu'une paire de capteurs ne peut établir une liaison de communication que si la distance entre eux est inférieure ou égale au rayon de communication  $R_c$ , chaque capteur doit pouvoir expédier le trafic de données au Sink, éventuellement après retransmission par d'autres capteurs agissant en tant que relais.

À l'intérieur du champ de déploiement, on suppose l'existence d'un ensemble discret de positions candidates pour déployer les capteurs, dénotée  $P$ . On utilise la notation  $P_i$  pour désigner l'ensemble de positions où les capteurs déployés peuvent établir une liaison de communication directe avec un capteur déployé à la position  $i$ . Par conséquent, pour

$i \in P$ ,  $P_i = \{j \in P \cup \{s\} : i \neq j; d_{ij} \leq R_c\}$ , où  $d_{ij}$  dénote la distance entre les positions  $i$  et  $j$ . De même, on emploie  $d_{ib}$  pour représenter la distance entre la position  $i \in P$  et la cible  $b \in B$ .  $M_b$  dénote le sous-ensemble de positions où un capteur déployé peut couvrir la cible  $b$ .

En outre, chaque cible doit être surveillée avec une certaine fréquence (e.g., nombre de mesures par seconde) par chaque capteur associé. Chaque surveillance de cible contribue à la production d'un paquet de données de  $d$  bits qui doit être acheminé au Sink.

Nous introduisons dans la suite un programme linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) qui modélise le problème d'optimisation du nombre de capteurs déployés sous des contraintes de couverture et de connectivité de cible. Par la suite, nous étendons cette formulation pour traiter le cas où le réseau résultant doit rester opérationnel pour une durée de vie prescrite, considérant que chaque capteur est équipé d'une quantité finie d'énergie.

### V.2.1. Modèle sans contrainte de durée de vie « Lifetime-Unaware Model »

Notre premier MILP est construit à l'aide de trois types de variables de décision. D'abord,  $x_i$  ( $i \in P$ ) est un binaire indiquant si un capteur est déployé à la position  $i$ .  $y_{ib}$  ( $i \in P$  et  $b \in B$ ) est un autre binaire qui est égal à 1 quand un capteur placé à  $i$  surveille la cible  $b$ . Enfin,  $f_{ij}$  ( $i, j \in P$ ) est une variable continue représentant la quantité du trafic de données envoyée d'un capteur situé à la position  $i$  à un capteur situé à la position  $j$ . Dans le cas particulier où le récepteur est le Sink, nous utilisent la notation  $f_{is}$ .

Paramètre	Définition
$P$	ensemble de positions possibles pour les capteurs
$B$	ensemble de cibles
$R_s$	rayon de couverture
$R_c$	rayon de communication
$d$	taille d'un paquet de donnée
$\alpha$	fréquence de détection
$K$	nombre de capteurs couvrant chaque cible
$T$	durée de vie minimale
$s$	position du Sink
$L$	la quantité maximale du trafic qui peut être reçue et envoyée par chaque capteur
$M_b$	ensemble de positions où un capteur déployé peut couvrir la cible $b \in B$
$P_i$	ensemble de positions où un capteur déployé peut communiquer avec un capteur déployé à la position $i \in P$
Variable	
$x_i$	un binaire indiquant si un capteur est déployé à la position $i \in P$
$y_{ib}$	un binaire indiquant si capteur déployé à la position $i$ couvre la cible $b \in B$
$f_{ij}$	la quantité du trafic entre le capteur déployé à la position $i$ et le capteur déployé à position $j$

Tableau V.1. Paramètres et variables du modèle

L'énoncé de notre modèle MILP appelé LUM est le suivant :

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i \in P} x_i \tag{V.1.1}$$

$$\sum_{i \in M_b} y_{ib} \geq K \quad \forall b \in B \tag{V.1.2}$$

$$y_{ib} \leq x_i \quad \forall i \in P, b \in B \tag{V.1.3}$$

$$\sum_{j \in P_i} f_{ji} + \alpha d \sum_{b=1}^B y_{ib} = \sum_{j \in P_i} f_{ij} \quad \forall i \in P \tag{V.1.4}$$

$$\sum_{i \in P_s} f_{is} = \alpha d K |B| \quad (\text{V.1.5})$$

$$\sum_{j \in P_i} (f_{ji} + f_{ij}) \leq L x_i \quad \forall i \in P \quad (\text{V.1.6})$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in P \quad (\text{V.1.7})$$

$$y_{ib} \in \{0,1\} \quad \forall i \in P, b \in B \quad (\text{V.1.8})$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in P \quad (\text{V.1.9})$$

La fonction objectif (V.1.1) minimise le nombre de capteurs déployés. La contrainte (V.1.2) s'assure que chaque cible est couverte par  $K$  capteurs au minimum. La contrainte (V.1.3) impose que toute cible couverte par un capteur situé à la position  $i$  soit réellement valide seulement s'il existe un capteur déployé à cette position. La contrainte (V.1.4) représente la règle conservation de flux à chaque position de capteur. Notez que cette contrainte est vérifiée également quand il n'y a aucun capteur déployé à la position référencée. La contrainte (V.1.5) s'assure que toutes les données captées atteignent le Sink. Finalement, la contrainte (V.1.6) évite l'incohérence du modèle car aucun flux de données ne peut commencer ou passer par une position donnée si aucun capteur n'est déployé.  $L$  dénote une constante égale à  $2\alpha d K^*/|B|$ , c'est la quantité maximale du trafic qui peut être reçue et envoyée par chaque capteur déployé.

### V.2.2. Les modèles avec contrainte de durée de vie

Dans l'objectif d'amélioration des performances du réseau en termes de consommation d'énergie, nous avons pris en compte dans la phase de déploiement la façon dont les données sont acheminées vers le Sink. Afin de tenir compte de cet aspect dans le processus de déploiement, le problème peut être formulé de deux manière : (i) minimiser le nombre de capteurs (le coût du réseau) tout en garantissant que la durée

de vie du réseau est au moins égale à une valeur donnée ; (2) Maximiser la durée de vie du réseau qui peut être atteinte sans dépasser un certain nombre de capteurs

### V.2.2.1. Modèle avec durée de vie prédefinie «Predefined Lifetime-Aware Model»

Supposons que le processus de déploiement de capteurs doit tenir compte une certaine durée de vie à atteindre. Une conséquence probable de cette nouvelle règle est que plus de capteurs peuvent être déployés dans le champ car l'énergie exigée pour la transmission serait répartie sur un plus grand nombre de capteurs.

A cette fin, nous avons ajouté une autre contrainte au problème LUM défini précédemment afin de concevoir un placement de capteur qui permet au réseau de fonctionner pendant au moins une période de temps  $T$ .

En supposons que chaque capteur a une quantité initiale d'énergie égale à  $E_i$  et conformément au modèle de consommation d'énergie indiqué dans (IV.9.1) et (IV.9.2), un ensemble de conditions suffisantes pour que le réseau fonctionne jusqu'à une période  $T$  peut être exprimé comme:

$$\sum_{j \in P_i} e_e f_{ji} + \sum_{j \in P_i} (e_e + e_a d_{ij}^2) f_{ij} \leq \frac{E_i}{T} \quad \forall i \in P \quad (\text{V.2})$$

Avec:

$e_e$ : énergie électrique

$e_a$ : énergie d'amplification

Le premier et le deuxième terme dans le côté gauche de la contrainte comptabilisent la quantité d'énergie nécessaire à la réception et la transmission de données par seconde, respectivement. Cette contrainte est trivialement satisfaite même si aucun capteur n'est déployé à l'emplacement correspondant car la contrainte (V.1.6) permet d'obtenir un trafic nul à cet emplacement. Pour récapituler, le modèle «Predefined Lifetime-Aware Model» PLAM est semblable à LUM (V.1.1)-(V.1.9), plus la contrainte (V.2).

### Exemple de l'impact de la contrainte de durée de vie

L'exemple représenté dans Figure V.1 illustre l'impact de la durée de vie sur le déploiement de capteurs tel que déterminé par LUM et PLAM. Étant donné que 10 cibles (étoiles) sont placées arbitrairement à l'intérieur d'un champ, nous observons que le nombre de capteurs nécessaire (disques noirs) n'augmente pas entre LUM et PLAM avec  $T$  (83 min). En revanche, nous notons que les trois cibles sur la droite sont couvertes par trois capteurs en cas de PLAM, contre seulement deux capteurs dans le premier cas. Par conséquent, la génération du trafic et le relais sont distribués plus équitablement entre les capteurs, ce qui contribue à étendre la durée de vie. Dans le troisième cas, deux capteurs supplémentaires sont nécessaires pour que le réseau fonctionne durant 166 min.

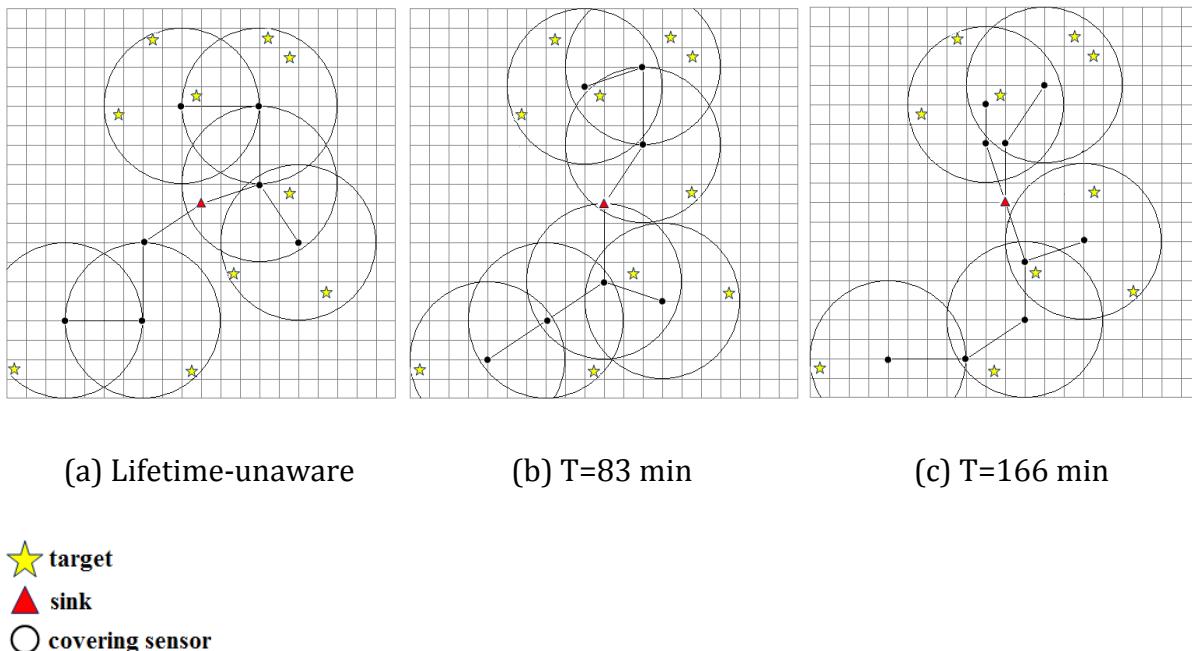


Figure V.1. Exemples de topologie de déploiement des capteurs

#### V.2.2.2. Modèle avec durée de vie maximale «Maximum Lifetime-Aware Model»

Supposons que la première préoccupation du concepteur du WSN est de réduire le coût de déploiement, et que la durée de vie soit une préoccupation plus secondaire. Pour

répondre à cette situation, nous proposons une approche de solution qui fonctionne en deux étapes. La première détermine le nombre optimal de capteurs nécessaires pour la mise en place du réseau sans contraintes de durée de vie. La deuxième étape maximise la durée de vie du réseau en n'utilisant que le nombre de capteurs déterminé lors de la première étape. Cette approche produit donc un déploiement qui favorise une répartition de charge plus pertinente tout en investissant le même coût.

Par conséquent, nous résolvons d'abord le problème LUM pour obtenir un nombre optimal de capteur assurant la couverture et la connectivité du réseau. Ensuite, nous utilisons ce nombre que nous notons  $N_{op}$  comme un paramètre dans notre 3<sup>ème</sup> modèle «Maximum Lifetime-Aware Model» MLAM, formalisé ci-dessous

$$\text{Minimize} \quad \Delta \quad (\text{V.3.1})$$

$$\sum_{i \in P} x_i \leq N_{op} \quad (\text{V.3.2})$$

$$\sum_{i \in M_b} y_{ib} \geq K \quad \forall b \in B \quad (\text{V.3.3})$$

$$y_{ib} \leq x_i \quad \forall i \in P, b \in B \quad (\text{V.3.4})$$

$$\sum_{j \in P_i} f_{ji} + \alpha d \sum_{b=1}^B y_{ib} = \sum_{j \in P_i} f_{ij} \quad \forall i \in P \quad (\text{V.3.5})$$

$$\sum_{i \in P_s} f_{is} = \alpha d K |B| \quad (\text{V.3.6})$$

$$\sum_{j \in P_i} (f_{ji} + f_{ij}) \leq L x_i \quad \forall i \in P \quad (\text{V.3.7})$$

$$\sum_{j \in P_i} e_e f_{ji} + \sum_{j \in P_i} (e_e + e_a d_{ij}^2) f_{ij} \leq \Delta \quad \forall i \in P \quad (\text{V.3.8})$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in P \quad (\text{V.3.9})$$

$$y_{ib} \in \{0,1\} \quad \forall i \in P, b \in B \quad (\text{V.3.10})$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in P \quad (\text{V.3.11})$$

La fonction objectif (V.3.1) minimise la quantité d'énergie consommée par chaque capteur que nous notons  $\Delta$ . La contrainte (V.3.2) s'assure que le nombre total de capteurs déployés est égal au nombre optimal issu de la résolution de l'étape LUM. La contrainte (V.3.8) vérifie que la quantité d'énergie consommée par chaque capteur est inférieure ou égale à la quantité d'énergie maximale que consomme un capteur dans le réseau. Le reste des contraintes sont identiques que celles du LUM.

### V.3. Approches heuristiques

Les modèles MILP présentés précédemment fournissent des solutions exactes pour le problème de placement de capteur mais sont difficiles à résoudre pour de grandes instances car la programmation linéaire en nombres entiers mixtes est NP-difficile en général (Papadimitriou & Steiglitz, 1998). De plus, le problème du déploiement avec coût minimum est NP-difficile (Wei-Chieh, Bing-Hong, & Ming-Jer, 2011). En particulier, selon le nombre de cibles et la densité des emplacements possibles des capteurs, le nombre de variables binaires peut être très grand.

Dans cette section, nous présentons un ensemble d'approches heuristiques visant à obtenir des solutions de haute qualité dans un temps raisonnable. Ces approches sont fondées sur la technique du fixage séquentiel «*sequential fixing*» (SF). Le mécanisme de base derrière SF est la relaxation linéaire d'un MILP, mais au lieu de fixer toutes les valeurs des variables continues (prennent une valeur entière) en une seule itération, la méthode procède itérativement en fixant une ou un petit nombre de variables à la fois (i.e., ces variables deviennent des constantes), puis résolvant le problème relaxé avec les variables continues. Ce processus est répété jusqu'à ce que toutes les variables soient fixées comme c'est montré dans la Figure V.2.

Le SF réduit le problème initial MILP à une séquence de problèmes LP qui peuvent être résolus en temps polynomial. En contrepartie, le SF reste une procédure heuristique et ne garantit pas les solutions optimales.

Par la suite, nous décrivons trois procédures heuristiques alternatives basées sur la technique SF pour résoudre les modèles de placement des capteurs que nous avons décrits précédemment.

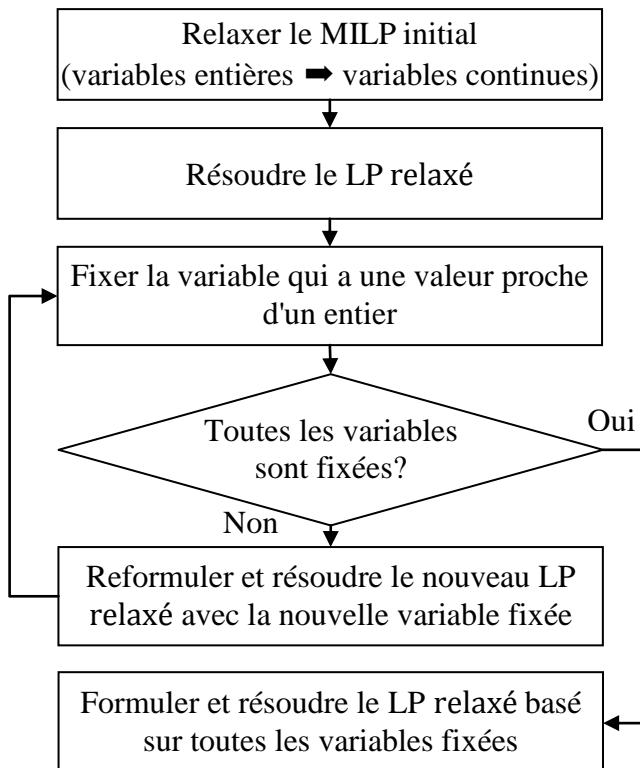


Figure V.2. Les étapes du SF

### V.3.1. Fixage séquentiel de couverture à la fois

Comme indiqué dans l'Algorithme V.1, la procédure du fixage séquentiel de couverture à la fois «Cover at Once Sequential Fixing» (CO-SF) comporte deux étapes. D'abord, après la résolution du LP relaxé du problème initial (MILP), nous choisissons pour chaque cible  $b \in B$ ,  $k$  emplacements de capteur  $i \in P$  en se basant sur la distance de  $y_{ib}$  par rapport à 1.

Cette sélection se termine lorsque toutes les variables correspondantes  $x$  et  $y$  sont mises à 1. A cet instant, chaque cible est couverte par au moins  $k$  capteur mais le réseau

constitué par ces capteurs et le Sink n'est pas nécessairement connecté. Dans ce cas nous résolvons le LP relaxé, à plusieurs reprises si nécessaire, jusqu'à ce que le réseau soit connecté. À chaque itération, l'objectif est de réduire au minimum le nombre de nouveaux emplacements de capteur ajoutés. L'emplacement choisi (ou fixé) est celui où la variable  $x_i$  correspondante est la plus proche de 1.

---

**Algorithme V.1. CO-SF**

---

**Entrée:** problème LUM ou LAM

**Sortie:** solution faisable

$X \leftarrow \emptyset, Y \leftarrow \emptyset$

Résoudre le problème LP relaxé;

**Pour**  $b \in B$  **faire**

**Pour**  $h \leftarrow 1$  à  $K$  **faire**

$x_n \leftarrow 1$  and  $y_{nb} \leftarrow 1$  avec  $n = \min_{i \in P}(1 - y_{ik})$ ;

$X \leftarrow X \cup \{n\}, Y \leftarrow Y \cup (n, b)$ ;

**Finpour**

**Finpour**

**Tantque** le réseau n'est pas entièrement connecté **faire**

Résoudre le LP relaxé Avec les mises à jour suivantes:

1. définir l'objectif :  $\min \sum_{i \in P} x_i$  avec  $P' = P \setminus X$

2. ajoutez les contraintes d'égalité suivantes si elles ne sont pas encore incluses:

**Pour**  $i \in X$  et  $(i, b) \in Y$  **faire**

$x_i = 1$  et  $y_{ib} = 1$ ;

**Finpour**

$X \leftarrow X \cup \{n\}$  avec  $n = \min_{i \in P}(1 - x_i)$

**Fintantque**

---

### V.3.2. Fixage séquentiel d'un seul capteur

Dans la deuxième approche appelée «Single Sensor Sequential Fixing» (SS-SF), nous déployons seulement un capteur à chaque itération jusqu'à ce que toutes les cibles soient k-couvertes. Comme décrit dans l'Algorithme V.2, nous assignons à chaque capteur nouvellement déployé toutes les cibles dans son rayon de couverture qui ne sont pas déjà k-couvertes. Par la suite, nous procédons d'une façon semblable que CO-SF en déployant des capteurs de relais jusqu'à ce que la connectivité du réseau soit réalisée.

SS-SF exige en moyenne plus d'itérations de LP que CO-SF, mais il recherche à déployer les capteurs de manière plus prudente.

---

### Algorithme V.2. SS-SF

---

**Entrée:** problème LUM ou LAM

**Sortie:** solution faisable

$X \leftarrow \emptyset, Y \leftarrow \emptyset$

**Tantque**  $|Y| < |B|^*K$  faire

    résoudre le problème LP relaxé;

    électionner la position du capteur  $n = \min_{i \in P} (1 - y_{ib})$

    affectez toutes les cibles couvertes par  $n$  (i.e.,  $y_{nb} = 1$ ) et mettre à jour les ensembles  $X$  et  $Y$ , et le LP;

**Fintantque**

**Tantque** le réseau n'est pas entièrement connecté faire

    Résoudre le LP relaxé Avec les mises à jour suivantes:

        1. définir l'objectif :  $\min \sum_{i \in P}, x_i$  avec  $P' = P \setminus X$

        2. ajoutez les contraintes d'égalité suivantes si elles ne sont pas encore incluses:

**Pour**  $i \in X$  et  $(i, b) \in Y$  faire

$x_i = 1$  et  $y_{ib} = 1$ ;

**Finpour**

$X \leftarrow X \cup \{n\}$  avec  $n = \min_{i \in P} (1 - x_i)$

**Fintantque**

---

### V.3.3. Fixage séquentiel d'une seule cible

La troisième approche appelée «Single Target Sequential Fixing» (ST-SF) est davantage conservatrice que SS-SF car nous fixons seulement une seule cible couverte par itération. Par conséquent, même si un capteur nouvellement déployé peut couvrir plus d'une cible, nous fixons seulement la variable  $y_{ib}$  qui est la plus proche de 1. Autrement, ST-SF se comporte de la même manière comme indiqué dans l'Algorithme V.2.

## V.4. Résultats et évaluation des performances

Dans cette section, nous commençons par la présentation des expérimentations numériques que nous avons réalisées pour évaluer les performances de nos approches en termes de qualité de solution et de temps de calcul. Ensuite, nous identifions les paramètres les plus influents sur le coût de déploiement dans les WSNs. Nos modèles ont été implémentées en utilisant le langage C++ avec des appels appropriés au solveur

(MILP) de «IBM ILOG CPLEX 12.4.1» par la technologie «CPLEX Convert Technology API»<sup>1</sup>.

### V.4.1. Présentation de « IBM ILOG CPLEX Optimization Studio »

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio est un kit d'outils de développement de modèles d'optimisation pour la programmation mathématique et la programmation par contraintes. Il permet le déploiement d'un modèle d'optimisation dans les applications à l'aide de différents langages de programmation comme Java, .net, C et C++.

Cet outil comporte deux solveurs: IBM ILOG CPLEX pour la programmation mathématique (résolution de programmes linéaires en nombres fractionnaires, mixtes ou entiers et de programmes quadratiques) et IBM ILOG CP Optimizer pour la programmation par contraintes.

CPLEX est un des solveurs les plus performants, il est commercialisé par IBM depuis son acquisition de l'entreprise ILOG en 2009. CPLEX de IBM ILOG<sup>2</sup> est disponible gratuitement pour usage académique.

### V.4.2. Environnement d'expérimentation

Le champ de capture est représenté sous forme de grille carrée 21x21 recouvrant 1 kilomètre carré. Chaque point sur la grille constitue un emplacement potentiel de déploiement d'un capteur dans  $P$ . Le rayon de couverture  $R_s$  et le rayon de communication  $R_c$  sont tous les deux fixés à 100 m alors que chaque capteur potentiel est initialisé avec une quantité d'énergie égale à 0,5 Joules. En règle générale, chaque configuration de problème a été résolue sur 10 instances. Les Figures ultérieures présentent les moyennes.

---

<sup>1</sup> <https://www-01.ibm.com/software/websphere/products/optimization/cplex-studio-community-edition/>

<sup>2</sup> <http://www.ilog.com/products/cplex>

### Les métriques de performances

Les performances des approches proposées sont évaluées selon les 3 métriques suivantes :

- Le GAP des approches heuristiques : désigne la qualité de la solution en terme d'écart relatif entre la solution optimale exacte et la solution obtenue par les méthodes heuristiques.
- Le GAP de la solution exacte : désigne l'écart entre la meilleure solution trouvée et la borne inférieure de la solution fournie par la relaxation LP.  
$$GAP = ((meilleure\ solution\ trouvée - borne\ inférieure) * 100) / meilleure\ solution\ trouvée$$
- Le nombre de capteurs déployés.
- Le temps de calcul.

#### V.4.3. Comparaison entre l'approche exacte et les approches heuristiques

Pour avoir un aperçu sur la difficulté du problème, nous représentons dans la Figure V.3 l'évolution du gap entre la meilleure solution trouvée et la borne inférieure actuelle du LP dans le cas où la solution exacte de MILP est recherchée pour 40 cibles. Nous pouvons voir que même après 20 heures de calcul, le gap n'est pas moins de 40%. Ceci signifie que le nombre actuel de capteurs pourrait être pratiquement réduit par ce pourcentage. Une autre remarque est que l'amélioration de solution devient très lente et réduite après une heure de calcul.

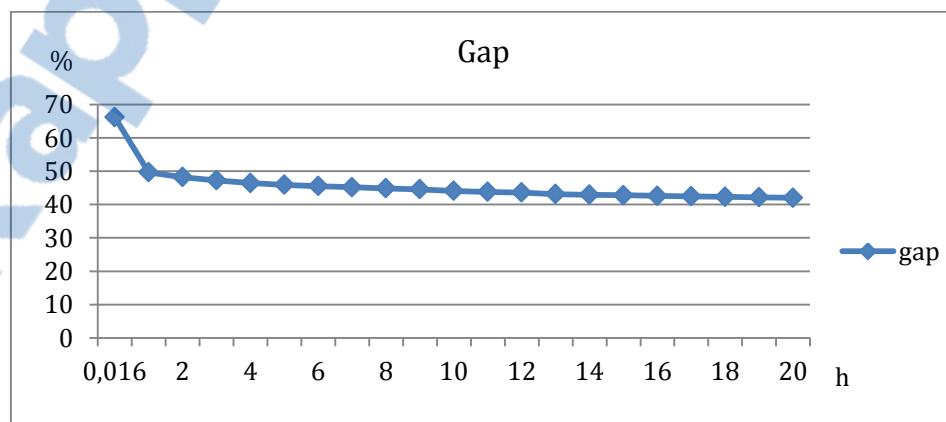


Figure V.3. Évolution d'intervalle entre la meilleure solution de MILP et la limite de LP

En revanche, le Tableau V.2 présente les temps de calcul requis pour résoudre les mêmes instances de problème avec nos trois approches heuristiques sont beaucoup plus réduits. Comme prévu, CO-SF s'exécutent plus rapidement que ST-SF et SS-SF parce que toutes les cibles sont couvertes avec une seule itération de LP. ST-SF est la procédure la plus lent car seulement une couverture de cible est fixe par résolution de LP, qui a évidemment comme conséquence plus d'itérations.

#Inst.	Temps CPU (sec.)		
	CO-SF	ST-SF	SS-SF
1	23	74	143
2	28	72	131
3	20	74	28
4	19	65	27
5	16	70	28
6	24	69	33
7	20	71	31
8	23	80	33
9	28	67	31
10	56	189	31
Moy.	25.6	83.2	51.7

Tableau V.2. Temps de calcul des approches heuristiques pour 40 cibles

Ainsi, le souci principal avec ces approches heuristiques se situe davantage dans leur le gap approximatif. Les Tableaux V.3 et V.4 donnent quelques réponses pour 20 et 40 cibles, respectivement. Une observation intéressante est que le gap moyen entre la solution exacte et l'heuristique est autour de 25%, indépendamment du nombre de cibles.

Ce résultat peut davantage être apprécié en rappelant que le gap général pour 40 cibles reste au-dessus de 40%, même après 20 heures de calcul, tandis que de meilleures solutions sont fournies par les procédures heuristiques en quelques dizaines de secondes.

Par ailleurs, nous pouvons constater qu'il n'y pas de procédure parmi les trois qui fournit systématiquement la meilleure solution. Celle-ci peut changer d'une instance à l'autre. Par exemple, le gap approximatif pour l'instance 1 dans le Tableau V.4 est 12%

avec CO-SF et 19% avec ST-SF, alors qu'il grimpe jusqu' à 32% pour l'instance 8, plus grand que le 23% donné par ST-SF. La même observation avec SS-SF.

#Inst.	Nombre de capteurs déployés				Gap		
	CO-SF	ST-SF	SS-SF	Exact	Exact/CO-SF	Exact/ST-SF	Exact/SS-SF
1	12	12	12	9	33%	33%	33%
2	13	13	13	10	30%	30%	30%
3	10	12	12	8	25%	50%	50%
4	14	15	14	11	27%	36%	27%
5	12	12	12	9	33%	33%	33%
6	11	10	10	9	22%	11%	11%
7	11	11	11	9	22%	22%	22%
8	11	12	12	9	22%	33%	33%
9	10	9	9	8	25%	13%	13%
10	10	10	10	8	25%	25%	25%
Moy.	11.4	11.6	11.5	9	26.56%	28.72%	27.81%

Tableau V.3. Solutions et gaps pour 20 cibles

#Inst.	Nombre de capteurs déployés				Gap		
	CO-SF	ST-SF	SS-SF	Exact	Exact/CO-SF	Exact/ST-SF	Exact/SS-SF
1	29	31	30	26	12%	19%	15%
2	31	27	27	23	35%	17%	17%
3	26	28	26	22	18%	27%	18%
4	24	24	26	20	20%	20%	30%
5	21	21	21	18	17%	17%	17%
6	29	30	29	24	21%	25%	21%
7	25	30	27	22	14%	36%	23%
8	29	27	28	22	32%	23%	27%
9	36	28	30	22	64%	27%	36%
10	26	27	25	20	30%	35%	25%
Moy.	27,6	27,3	26,9	21,9	26,11%	24,69%	22,98%

Tableau V.4. Solutions et gaps pour 40 cibles

#### V.4.4. Comparaison entre les approches exactes : LUM, PLAM et MLAM

Le but de cette section est d'évaluer et comparer les performances des approches exactes sous la contrainte d'énergie.

Nous avons présenté dans la Figure V.4 le nombre de capteurs pour 10 instances de 20 cibles. Nous constatons que l'approche PLAM nécessite plus de capteurs pour assurer la durée de vie de 166 min. Nous pouvons également remarquer que le nombre de

capteurs diffère d'une instance à l'autre. Cela est dû à la répartition des cibles sur le champ.

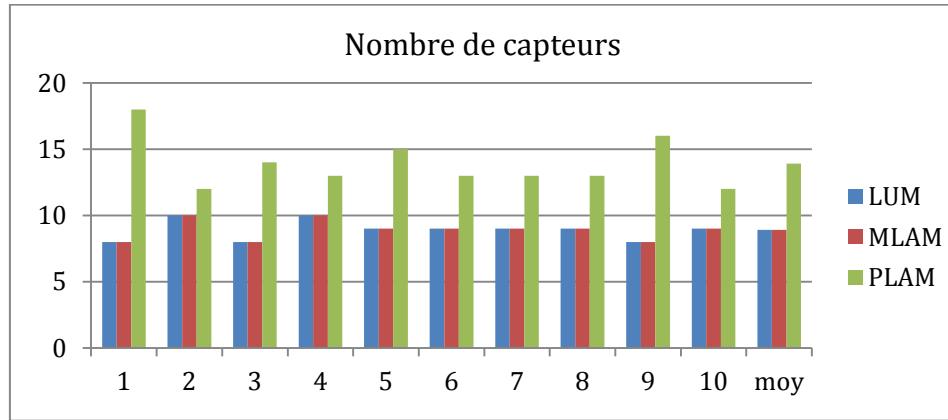


Figure V.4. Nombre de capteurs déployés pour 20 cibles

Les résultats illustrés dans la Figure V.5 montrent clairement la différence entre les durées de vie assurées par chaque approche. L'approche MLAM augmente la durée de vie du réseau jusqu'au triple par exemple dans le cas de l'instance 9 et plus que le double pour les instances 2 et 10. MLAM assure une augmentation importante de la durée de vie avec le même nombre de capteurs utilisé dans LUM.

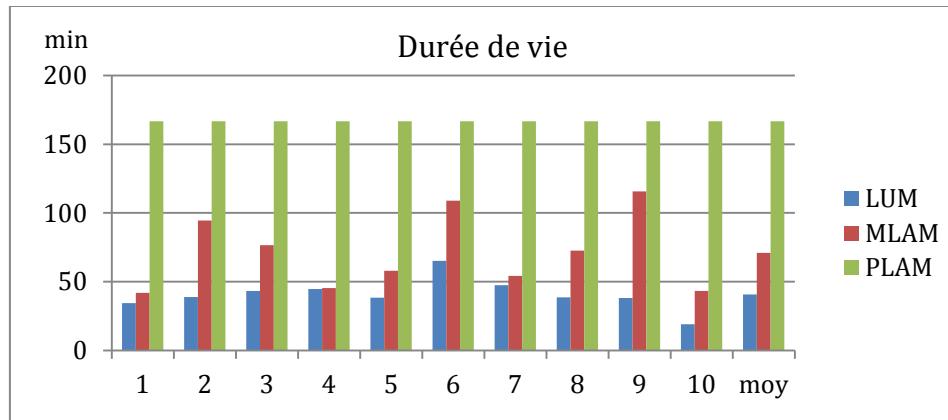


Figure V.5. Durée de vie pour 20 cibles

Les Figures V.6 et V.7 donnent un aperçu sur la quantité d'énergie consommée par chaque capteur et la durée de vie respectivement. Le traitement de la contrainte d'énergie en même temps que les autres génère une topologie qui favorise une bonne répartition des charges. Par conséquent, la consommation d'énergie est répartie de manière plus équitable, ce qui augmente la durée de vie total du réseau.

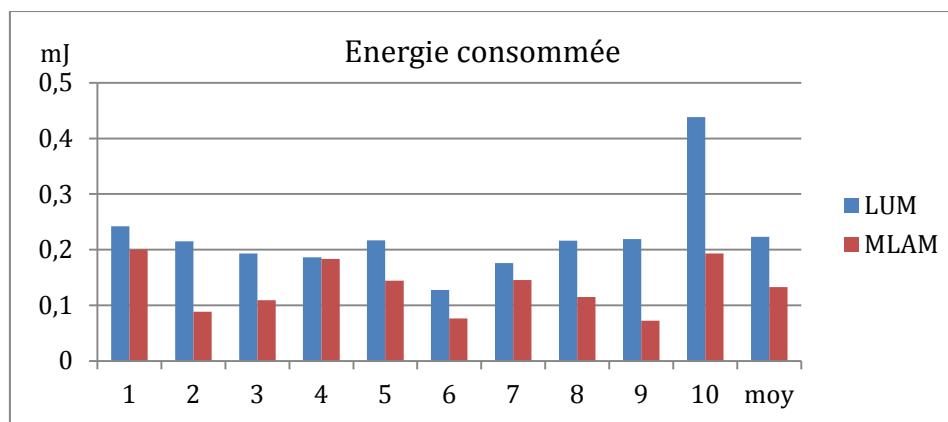


Figure V.6. Energie consommée pour 20 cibles

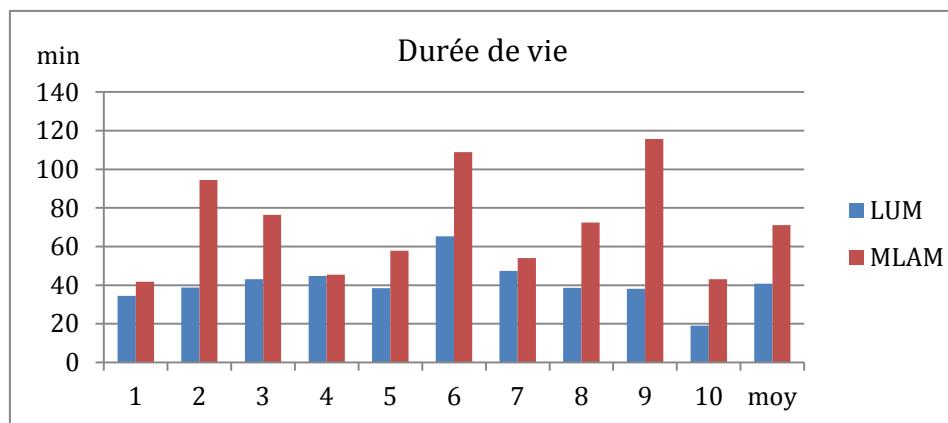


Figure V.7. La durée de vie assurée pour 20 cibles

Les Figures V.8 et V.9 présentent l'énergie consommée par chaque capteur et la durée de vie pour un nombre de cibles qui varie de 10 à 50. Les résultats montrent le rapport entre le nombre de cibles et la consommation d'énergie. L'écart entre les approches augmente avec la croissance du nombre de cibles.

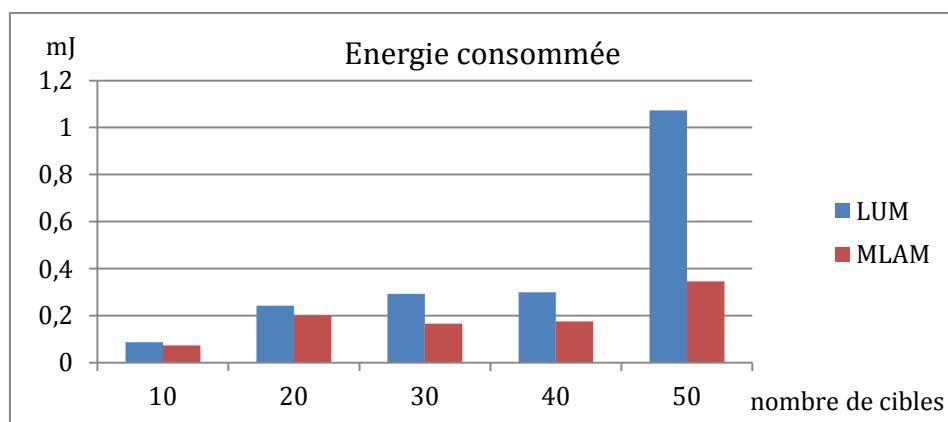


Figure V.8. Energie consommée

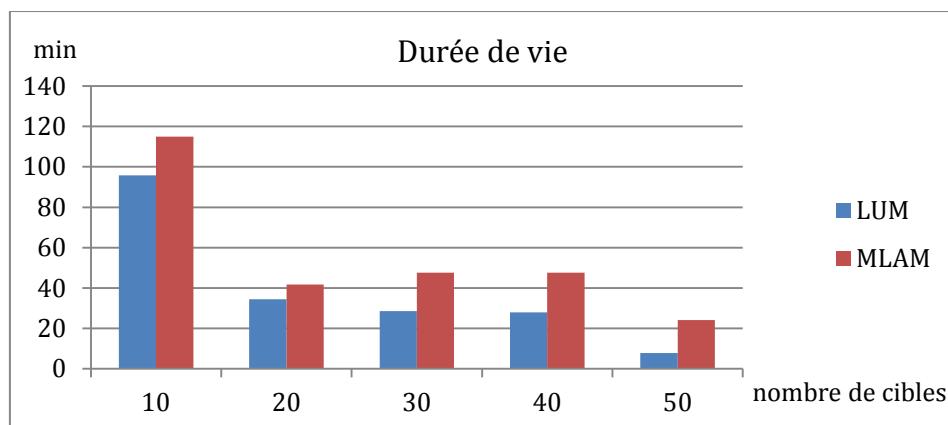


Figure V.9. La durée de vie

#### V.4.5. Impact des paramètres du réseau

D'abord, nous évaluons l'impact de la durée de vie requise  $T$  sur le nombre de capteurs déployés. Nous traçons cette quantité dans la Figure V.10 en utilisant l'approche CO-SF à partir du modèle ignorant la durée de vie (LUM), en supposant que 40 cibles doivent être surveillées. Une observation intéressante est que le nombre de capteurs déployés dépend quasi linéairement de la durée de vie exigée du réseau. Par exemple, étendre la durée de vie du réseau par le facteur 2 double le nombre de capteurs déployés. Ceci résulte du fait que chaque capteur obtiendra une part inférieure du trafic à transmettre quand plus de capteurs sont déployés, ce qui prolonge la durée de vie globale. En outre, une plus grande densité des capteurs produit des liens de communication plus courts et par conséquent moins de consommation d'énergie.

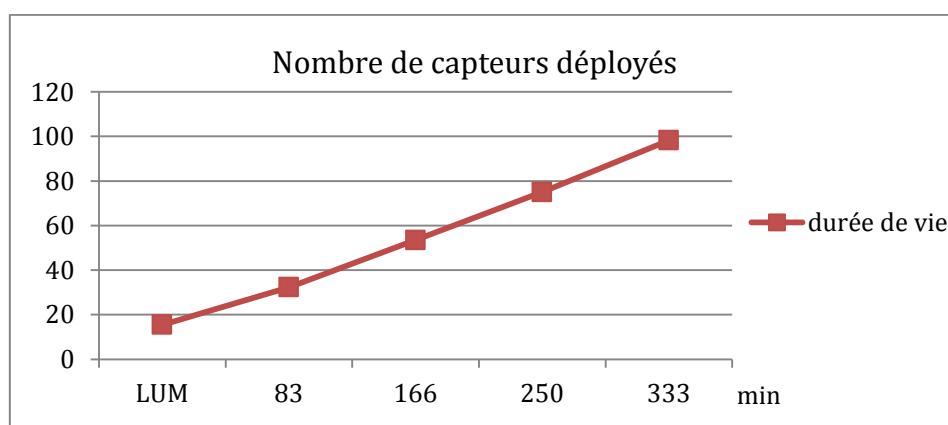


Figure V.10. Nombre de capteurs déployés sous différentes durées de vie

Dans la Figure V.11, nous évaluons le nombre de capteurs déployés sous différentes séparations physiques entre les emplacements potentiels sur la grille (ensemble  $P$ ). Nous comparons trois scénarios où des capteurs sont déployés sur un champ identique mais avec différentes tailles de grille, à savoir  $11 \times 11$ ,  $21 \times 21$  et  $51 \times 51$ , en effectuant des moyennes sur 10 instances. Notons que ces valeurs résultent en une séparation minimale de 10, 25 et de 50m, respectivement, entre les emplacements adjacents. Les résultats pour un certain nombre de cibles, allant de 40 à 100, illustrent qu'une densité plus élevée des emplacements potentiels des capteurs réduit le nombre de capteurs. Par exemple, dans les cas de 70 et 90 cibles, nous notons une diminution de près de 20% entre 10 et 50m.

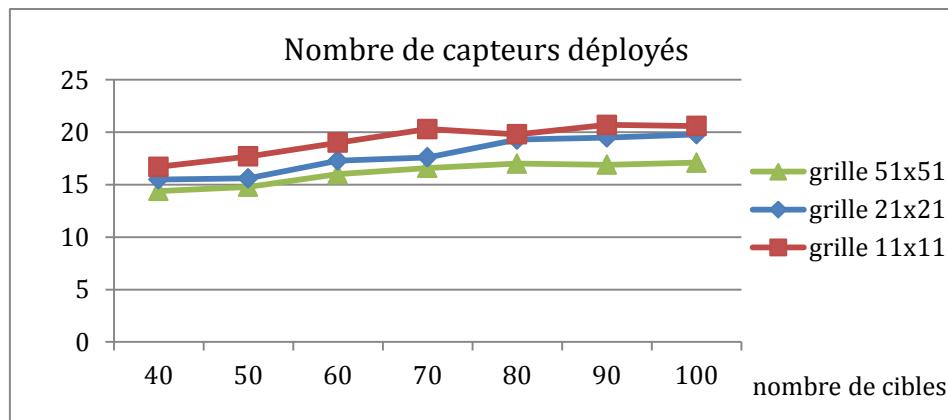


Figure V.11. Nombre de capteurs déployés sous différente taille de grille

Finalement, la Figure V.12 mesure l'impact du rayon de couverture  $R_s$  sur le nombre de capteurs. Les résultats montrent clairement l'économie du coût substantielle qui peut être faite si les capteurs pouvaient couvrir des phénomènes sur une des plus grandes distances. Ceci peut être expliqué par le nombre plus élevé de possibilités qui existent pour un nombre réduit de capteurs pour former un réseau connecté tout en accomplissant leurs tâches de capture.

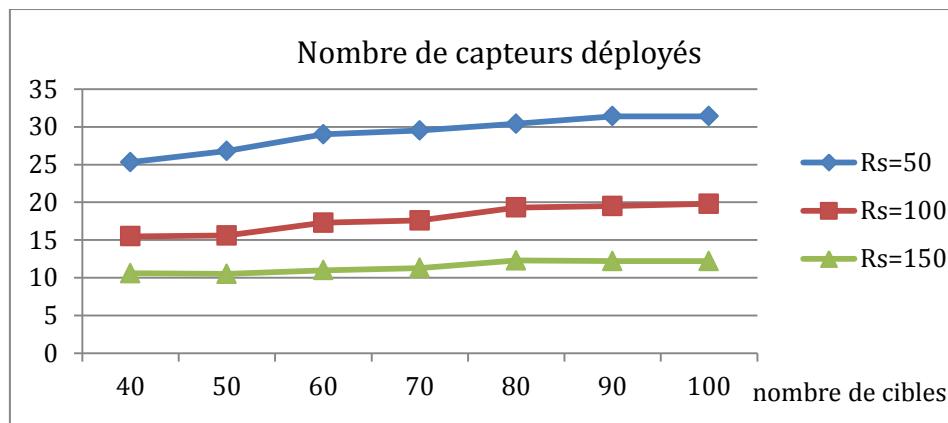


Figure V.12. Nombre de capteurs déployés sous différent rayon de couverture

#### V.4.6. Impact de la k-couverture

De nombreuses applications pratiques, telles que la détection d'incendie, la détection de rayonnement et la détection d'intrusion, exigent un niveau élevé de précision de mesure, de tolérance aux pannes et de robustesse. Un moyen simple d'atteindre ces objectifs est de surveiller chaque cible par plusieurs capteurs (c'est-à-dire, la  $k$ -couverture). Notre modèle prend en charge également le scénario où chaque cible est couverte par  $k$  capteurs. Nous montrons dans la Figure V.13 le nombre minimum de capteurs pour couvrir chaque cible en fonction de  $k$ . Nous considérons 40 et 80 cibles sur une de grille de 21x21 et une surface de 500x500m<sup>2</sup>. Nous pouvons remarquer que ce nombre augmente quasi linéairement avec le degré de couverture. En particulier, nous observons dans les deux scénarios que l'augmentation du niveau de couverture de 1 à 3 nécessite que le nombre de capteurs soit multiplié par 2.

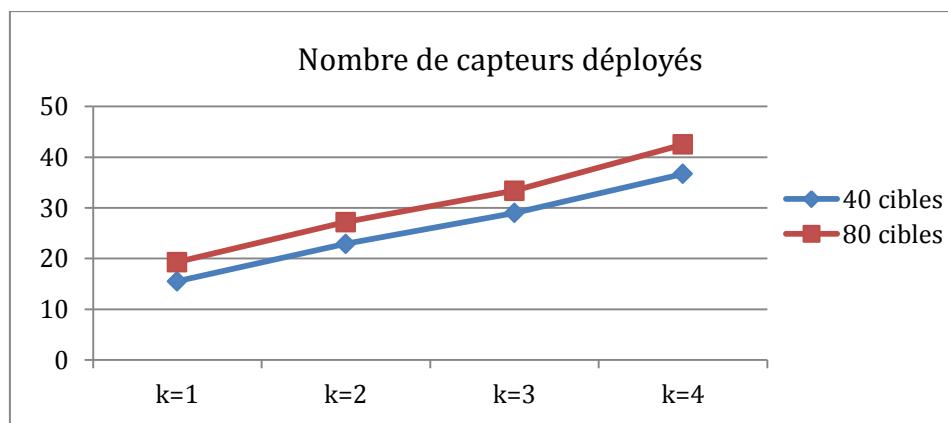


Figure V.13. Nombre de capteurs déployés sous différents k-couverture

## V.5. Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre différentes stratégies de déploiement assurant la  $k$ -couverture de toutes les cibles, la connectivité réseau, l'allongement de la durée de vie du réseau à une période prédefinie, tout en minimisant le coût de déploiement.

Nous avons formulé deux modèles MILP avec et sans la contrainte de la durée de vie du réseau à atteindre. En raison de la difficulté du problème, nous avons proposé trois procédures heuristiques basées sur le LP qui reposent sur la technique de fixage séquentiel permettant de résoudre des problèmes contenant de nombreuses variables entières. Nos nombreuses expérimentations numériques ont montré que ces procédures peuvent trouver des solutions proches des solutions optimales dans un temps raisonnable. Nos résultats montrent également l'impact important de la durée de vie sur le coût d'installation du réseau. Nous avons constaté que le nombre de capteurs déployés croit linéairement avec la durée de vie. Les résultats prouvent que le traitement de la contrainte d'énergie en même temps que les autres génère une topologie qui favorise une bonne répartition des charges. Par conséquent, la consommation d'énergie est répartie de manière plus équitable, ce qui augmente la durée de vie total du réseau.

## **Chapitre VI**

# **Conclusion Générale et Perspectives**

### VI.1. Conclusion générale

La performance d'un réseau de capteur sans fil est considérablement influencée par le processus de déploiement des capteurs. La problématique de déploiement des capteurs dans un WSN vise à définir la topologie du réseau, donc le nombre et les positions des capteurs. La qualité de la surveillance, la connectivité et la consommation d'énergie sont aussi directement affectées par la topologie de réseau.

Dans cette thèse, nous avons abordé le problème de déploiement optimal des capteurs dans les WSNs sous les conditions de couverture, de connectivité et de durée de vie. À cet effet, nous avons formulé plusieurs approches de solutions à ce problème.

Nous avons proposé des approches exactes en ILP et MILP qui fournissent des solutions optimales. En raison du temps de calcul important des approches exactes, nous avons proposé différentes approches heuristiques (sous-optimales), ainsi que mixtes, capables de fournir des stratégies de déploiement de haute qualité en un temps raisonnablement court tout en satisfaisant toutes contraintes en même temps.

Contrairement aux réseaux traditionnels qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service, les réseaux de capteurs doivent, en plus, donner de l'importance à la conservation d'énergie. Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau. Pour satisfaire cet objectif nous avons proposé une approche heuristique dans le chapitre IV. En plus nous avons intégrer la contrainte d'énergie dans les approches du chapitre V où elle est traitée en même temps que les autres contraintes.

D'autre part, nous avons pris en considération la couverture multiple des cibles. Pour cela, toutes les approches proposées dans le chapitre V assurent la k-couverture.

Finalement, nous avons évalué les différentes approches avec le solveur CPLEX d'IBM. Les résultats montrent l'impact de la contrainte de la durée de vie sur la topologie du réseau et sur le nombre de capteurs. Nous pouvons constater l'importance de la prise en considération de cette contrainte en même temps que les autres. Ce qui nous permet d'avoir une topologie avec une meilleure répartition de charge.

### **VI.2.Perspectives**

Les techniques de résolution des problèmes de déploiement, que nous avons proposées dans cette thèse, peuvent être toujours améliorées et affinées afin de prendre en charge un environnement plus proche du monde réel. Par exemple, le champ de déploiement peut se caractériser par la présence d'obstacles qui rendent la communication difficile, voire impossible, entre capteurs pourtant proches. Par ailleurs, le déploiement peut aussi intégrer d'autres propriétés non fonctionnelles comme la tolérance aux pannes. Dans la mesure où des capteurs peuvent tomber en panne à tout moment, une bonne stratégie de déploiement consiste à prévoir plusieurs chemins disjoints d'un capteur vers le Sink.

Par ailleurs, Il est intéressant de prévoir l'utilisation des capteurs hétérogènes avec des coûts différents. Nous pouvons aussi envisager l'utilisation des capteurs qui peuvent adapter dynamiquement leur rayon de capture et de communication ou même des capteurs mobiles. Enfin, nous pouvons également considérer des applications où le trafic doit être acheminé vers plusieurs Sinks, soit pour des besoins de redondance, d'équilibrage de charge, ou de différenciation des données.

## ***Conférences et publications internationales***

Fellah, S., Kaddour, M., & Lebbah, Y. (2015). Deployment approaches of wireless sensor networks considering lifetime extension. Second International Conference on New Technologies and Communication, (pp. 12-16). Chlef, Algeria.

Fellah, S., & Kaddour, M. (2017). Exact and Efficient Heuristic Deployment in WSN under Coverage, Connectivity, and Lifetime Constraints. *International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications*, 8 (2), 27-43.

### **Bibliographie**

Abhishek, K. S., Sunandita, D., & Ashraf, H. (2016). Efficient Deployment Strategies of Sensor Nodes in Wireless Sensor Networks. *International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies*, (pp. 69-73). New Delhi, India.

Abidin, H. Z., Din, N. M., & Radzi, N. A. (2013). Deterministic Static Sensor Node Placement in Wireless Sensor Network based on Territorial Predator Scent Marking Behavior. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 5 (3), 186-191.

Aina, R. (2015). *Modélisation de la consommation d'énergie En vue de la conception conjointe (matériel/logiciel) des applications embarquées*. Université de Nantes, France.

Ammari, H. M., & Das, S. K. (2012). Centralized and clustered k-coverage protocols for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, 61 (1), 118-133.

Ankita. (2014). A Survey on Wireless Sensor Network based Approaches. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 4 (4), 338-342.

Bang, w. (2011). Coverage Problems in Sensor Networks: A Survey. *ACM Computing Surveys*, 43 (4), 32:1-32:53.

Banimelhem, O., Mowafi, M., & Aljoby, W. (2013). Genetic Algorithm Based Node Deployment in Hybrid Wireless Sensor Networks. *Communications and Network*, 5 (4), 273-279.

Belmonte, H. (2011). *Étude, implémentation et évaluation d'un réseau de capteurs sans fil exploitant le concept de colportage de l'information*. Thèse, Conservatoire national des arts et métiers centre régional, France.

Benatia, M. A., Louis, A., Baudry, D., & Ma, B. (2014). WSN's modeling for a smart building application. *IEEE International Energy Conference*, (pp. 821-827). Cattat, Croatia.

Bhupesh, K. G., & Sudha, C. (2014). A Survey on Node Placement for Wireless Sensor Network Using Pso Algorithm. *IOSR Journal of computer science*, 2, 28-33.

Binitha, S., & Siva, S. (2012). A Survey of Bio inspired Optimization Algorithms. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 2 (2), 137-151.

## Bibliographie

---

- Boubrima, A., Bechkit, W., & Rivano, H. (2017). Optimal deployment of wireless sensor networks for air pollution monitoring. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16 (5), 2723-2735.
- Challal, Y. (2016). *Réseaux de capteurs sans fils*. Rapport technique, Ecole nationale Supérieure d'Informatique, Algérie.
- Cheng, X., Du, D., Wang, L., & Xu, B. (2008). Relay sensor placement in wireless sensor networks. *ACM/Springer Journal of Wireless Networks*, 14 (242), 347-355.
- Chiu, P. L., & Lin, F. Y. (2004). A simulated annealing algorithm to support the sensor placement for target location. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2, pp. 867-870.
- Cholavendhan, S., Kumar, S. R., & Karnan, M. (2014). A Survey on Application of Bio-Inspired Algorithms. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 5 (1), 366-370.
- De Rainville, F.-M. (2015). *Placement interactif de capteurs mobiles dans des environnements tridimensionnels non convexes*. Thèse, Université laval Québec, Canada.
- Deepika, G., & Rajapirian, P. (2016). Wireless Sensor Network in Precision Agriculture: A Survey. *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science*, (pp. 1-4). Pudukkottai, India.
- Delorme, X. (2000). *Optimisation combinatoire et problèmes de capacité d'infrastructure ferroviaire*. Thèse, Université de Valenciennes, France.
- Deyab, T. M., Baroudi, U. A., & Selim, S. Z. (2011). Optimal placement of heterogeneous wireless sensor and relay nodes. *7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, (pp. 65-70). Turkey, Istanbul.
- Divyani, G., Kanak, S., Vatika, G., Rajeshwa, P., & Kumar, A. K. (2015). LEACH-ENL: LEACH Protocol with Enhanced Network Lifetime in Wireless Sensor Network. *International Journal of Computer Science*, 3 (5), 4-14.
- Dorigo, M. (1992). *Optimization, learning and natural algorithms*. Thèse, Politecnico di Milano, Italy.
- Erdelj, M., & Razafindralambo, T. (2012). Multiple Target Discovery and Coverage with Mobile Wireless Sensors. *14èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications*, (pp. 1-4). La Grande Motte, France.

## Bibliographie

---

- Filippou, A., Karras, D. A., & Papademetriou, R. C. (2009). Coverage Problem for Sensor Networks: An Overview of Solution Strategies. *17th Telecommunications forum TELFOR*, (pp. 134-136). Belgrade, Serbia.
- Gallais, A., Carle, J., & Simplot-Ryl, D. (2007). La k-couverture de surface dans les réseaux de capteurs. *9eme Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications*, (pp. 77-80). Ile d'Oléron, France.
- Gursharan, K. B., & Amandeep, K. V. (2014). Deployment of nodes for Maximum Coverage in Heterogeneous Wireless Sensor Network Using Genetic Algorithm. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 2 (6), 116-121.
- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishna, H. (2000). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, (pp. 4-7). Washington, DC, USA.
- Hirani, K., & Singh, M. (2015). A Survey on Coverage Problem in Wireless Sensor Network. *International Journal of Computer Applications*, 116 (2), 1-3.
- Holger, K., & Andreas, W. (2005). *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley.
- Holland, J. H. (1973). Genetic algorithms and the optimal allocation of trials. *SIAM Journal on Computing*, 2 (2), 88–105.
- Hu, N., & Zhang, D. (2007). Optimized placement of nodes for target detection in sensor networks. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*, 2 (2), 167–171.
- Huan, Z., Qian, Z., Liang, Z., & Yan, W. (2015). A Novel Sensor Deployment Approach Using Fruit Fly Optimization Algorithm in Wireless Sensor Networks. *IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA*, 1, 1292-1297.
- Huping, X., Jiajun, Z., & Bang, W. (2015). On the Deployment of a Connected Sensor Network for Confident Information Coverage. *Sensors*, 15 (5), 11277-11294.
- IEEE. (2011, Sept). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, 1-314.
- Ines, K., Pascale, M., Anis, L., & Saoucene, M. (2014). Survey of Deployment Algorithms in Wireless Sensor Networks: Coverage and Connectivity Issues and Challenges. *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, 1-24.

## Bibliographie

---

- Jiguo, Y., Ying, C., Liran, M., Baogui, H., & Xiuzhen, C. (2016). On Connected Target k-Coverage in Heterogeneous Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 16 (104), 1-21.
- Jirí, M., & Bernd, G. (2007). *Understanding and Using Linear Programming*. Springer.
- Kai, L., Xiaofei, W., Limei, P., & Xuan, Z. (2013). Energy-Efficient K-Cover Problem in Hybrid Sensor Networks. *The Computer Journal*, 56 (8), 957-967.
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (abc) algorithm. *Journal of global optimization*, 39 (3), 459–471.
- Karine, D., & Mourad, H. (2013). A near optimal algorithm for lifetime optimization in wireless sensor networks. *2nd International Conference On Sensor Networks*, (pp. 197-202). Barcelona, Spain.
- Kirankumar, B. y., Ayashree, J., & Mallapur, D. (2015). Node Placement in Wireless Sensor Network: An Energy Approach. *National Conference on Recent Advances in Electronics & Computer Engineering*, (pp. 40-45). liT Roorkee, India.
- Krishnendu, C., Sitharama, I. S., Hairong, a., & Eungchun, C. (2002). Grid Coverage for Surveillance and Target Location in Distributed Sensor Networks. *IEEE Transaction Computers*, 51 (12), 1448-1453.
- Li, X. L., Shao, Z. J., & Qian, J. X. (2002). Optimizing method based on autonomous animats: Fish-swarm algorithm. *Xitong Gongcheng Lilun yu Shijian/System Engineering Theory and Practice*, 22 (11), 11–32.
- Manirajan, R., & Sathishkumar, K. R. (2015). Sleep/Wake Scheduling for Target Coverage Problem inWireless Sensor Networks. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 4 (3), 400-405.
- Manish, D., Nikita, U., & Sanjay, S. (2015). An Exhaustive Survey on Nature Inspired Optimization Algorithms. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 9 (4), 91-104.
- Maria, A. A. (2011). *Programmation linéaire en nombres entiers pour l'ordonnancement cyclique sous contraintes de ressources*. Thèse, Université de Toulouse III, France.
- Matthieu, L. B. (2014). *Optimisation de déploiement et localisation de cible dans les réseaux de capteurs*. Thèse, Université de technologie de Troyes, France.

## Bibliographie

---

- Mayukh, M. (2014). A brief survey on bio inspired optimization algorithms for molecular docking. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 7 (3), 868-878.
- Mini, S., Siba, U. K., & Samrat, S. L. (2014). Sensor Deployment and Scheduling for Target Coverage Problem in Wireless Sensor Networks. *IEEE sensor journal*, 14 (3), 636-644.
- Mohammad, F. U. (2012). *Design methods for optimal resource allocation in wireless networks*. Thèse, Université Concordia de Montréal, Canada.
- Mohsin, M., Sheikh, A. A., Manzoor, M. A., Felemban, E., & Qaisar, S. (2015). A Survey on Current Underwater Acoustic Sensor Network Applications. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 7 (1), 51-56.
- Moreno-Salinas, D., Pascoal, A. M., & Aranda, J. (2011). Optimal Sensor Placement for Multiple Underwater Target Localization with Acoustic Range Measurements . *18th IFAC World Congress*, (pp. 12825-12832). Milano, Italy.
- Nemati, F., & Rahmani, N. (2013). Using Voronoi Diagram and Genetic Algorithm to Deploy Nodes in Wireless Sensor Network. *International Journal of Soft Computing and Software Engineering*, 3 (3), 706-713.
- Nirupama, B., Deborah, E., Lewis, G., & John, H. (2001). Scalable Coordination for Wireless Sensor Networks: Self-Configuring Localization Systems. *6th IEEE International Symposium on Communication Theory and Application*, (pp. 1-6). Heidemann, UK.
- Papadimitriou, C. H., & Steiglitz, K. (1998). *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*. Prentice-Hall, Inc.
- Pardeep, K., & Vinay, B. (2015). Wireless Sensor Networks: A Survey. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 5 (5), 988-994.
- Pierre, F. (2013). *Programmation mathématique Discrète et Modèles Linéaires*. Université Pierre et Marie Curie, France.
- Ponmuthuramalingam, P., & Preethi, M. (2015). A Survey on Node Deployment for Sensing Mobile- Node in WSN. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 4 (6), 155- 158.
- Purnima, K., & Kumar, P. P. (2012). Target coverage management protocol for Wireless sensor network. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 35 (1), 20-25.

## Bibliographie

---

- Ramya, S. A., Devika, V., & Lakshmi, V. T. (2014). Wibree using digital radio technology. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 3 (1), 260-264.
- Ratna, R. M., & Laxmipriya, M. (2015). Analysis of Different Grid Types Used for Sensor Deployment in Wireless Sensor Network. *International Conference on Communication, Control and Intelligent Systems*, (pp. 91-95). Mathura, India.
- Raymond, M., & Ammari, H. M. (2010). Coverage in Wireless Sensor Networks: A Survey. *Network Protocols and Algorithms*, 2 (2), 27-53 .
- Sarammal, K., & Roseline, R. A. (2013). A Review: Wireless Sensor Networks and Its Application, Platforms, Standards and Tools. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 4 (8), 2905-2911.
- Senouci, M. R., Bouguettouche, D., Souilah, F., & Mellouk, A. (2014). Efficient Heuristic for the Deterministic Deployment of Wireless Sensor Networks. *5th International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing*. Marrakech, Morocco.
- Shivakumar, R., & LakshmiPathi, R. (2010). Implementation Of an innovative Bio Inspired GA and PS Algorithm for Controller design considering steam GT Dynamics. *International Journal of Computer Science Issues*, 7 (3), 18-28.
- Shobana, J. S., & Balasubramanian, P. (2015). *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 7 (2), 99-105.
- Soro, S., & Heinzelman, W. B. (2005). Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. In *Proceedings of 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*. Denver, CO, USA.
- Suneet, K. G., Pratyay, K., & Prasant, J. K. (2016). Genetic algorithm approach for k-coverage and m-connected node placement in target based wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 56, 544-556.
- Surekha, S., & KalyanRam, M. (2013). Coverage Of Total Target Field To Form WSN Using Delaunay Triangulation. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 4 (6), 796-799.
- Tinker, M. S., & Chinara, S. (2015). Energy Conservation Clustering inWireless Sensor Networks for Increased Life Time. *Advances in Computing and Communication Engineering*, (pp. 7-10).

## Bibliographie

---

- Wei-Chieh, K., Bing-Hong, L., & Ming-Jer, T. (2011). The critical-square-grid coverage problem in wireless sensor networks is NP-Complete. *Computer Network*, 55 (9), 2209-2220.
- Xiaochun, X., & Sartaj, S. (2006). *Approximation Algorithms For Wireless Sensor Deployment*. University of Florida, Gainesville.
- Younes, Y. (2012). *Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs*. Thèse, Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie.
- Zhao, J., Yağan, O., & Gligor, V. (2013). Secure k-connectivity in wireless sensor networks under an on/off channel model. *IEEE International Symposium on Information Theory*, (pp. 2790-2794). Istanbul, Turkey.
- Zorlu, O., & Ozgur, K. S. (2016). Increasing the coverage of homogeneous wireless sensor network by genetic algorithm based deployment. *Sixth International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications*, (pp. 109-114). Konya, Turkey.
- Zou, Y., & Chakrabarty, K. (2004). Uncertainty-aware and coverage-oriented deployment for sensor networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 64 (7), 788-798.

## ملخص

تطرح شبكات الحساسات اللاسلكية العديد من مشاكل التحسين الصعبة. في هذه الرسالة، نحن مهتمون باستراتيجيات النشر التي تؤدي إلى الحد الأدنى من الحساسات مع ضمان تغطية الأهداف واتصال الشبكة. تحقيقاً لهذه الغاية، نقترح مقاربة على أساس البرمجة الخطية الصحيحة وإجراء استدلالي سريع يوفر حلول ذات جودة عالية. وعلاوة على ذلك، اقترحنا إطالة مدة حياة الشبكة لفترة محددة مسبقاً على أساس التكرار الأمثل للحساسات وندهور تردد الاستشعار.

علاوة على ذلك، قمنا بتطوير مقاريبتين بدليلتين لنشر التغطية المتعددة على أساس البرمجة الخطية الصحيحة المختلطة واستغلينا تقنية التثبيت المتسلسل للبرمجة الخطية لتصميم ثلاثة إجراءات استدلالية. وبالإضافة إلى القواعد المذكورة أعلاه، وضعنا مقاربات تطيل مدة الحياة في إطار أهداف مختلفة. في الحالة الأولى نظرنا أن تستوفي فيها الشبكة مدة حياة معين. وعلاوة على ذلك، الثانية تطيل العمر باستخدام فقط العدد الأمثل للحساسات لتأسيس الشبكة.

**الكلمات المفتاحية:** شبكة الحساسات اللاسلكية، التغطية، الاتصال، الطاقة، مدة الحياة، البرمجة الخطية الصحيحة.

## Abstract

Wireless sensor networks lay down many challenging optimization problems. In this thesis, we are interested in deployment strategies that result in a minimum of sensors while ensuring target coverage and network connectivity. To this end, we propose approaches based on ILP and a fast-running heuristic procedure that still provide high quality solutions. Moreover, we have proposed an heuristic lifetime enhancement for predefined period based on optimal sensor redundancy and sensing frequency degradation.

Furthermore, we have developed two alternative k-coverage deployment approaches based on MILP and exploited the linear-programming sequential fixing technique to design three polynomial-time heuristic procedures. In addition to the rules stated above, we have developed approaches that extend lifetime under different objectives. In the first one, we have considered the situation where a given lifetime must be satisfied by the network. Moreover, the second maximizes lifetime by using only the optimum number of sensors for the implementation of the network.

**Keywords:** Wireless Sensor Network, Coverage, Connectivity, Energy, Lifetime, Integer Linear Programming.

## Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil posent de nombreux problèmes d'optimisation complexes. Dans cette thèse, nous nous intéressons aux stratégies de déploiement qui se traduisent par un minimum de capteurs tout en assurant la couverture de la cible et la connectivité réseau. À cette fin, nous proposons des approches basées sur PLNE et une procédure heuristique rapide qui fournit des solutions de haute qualité. De plus, nous avons proposé une heuristique de prolongation de la durée de vie pour une période pré définie basée sur la redondance optimale des capteurs et la dégradation de la fréquence de détection.

De plus, nous avons développé deux approches alternatives de déploiement assurant la k-couverture basées sur PL en nombres mixtes et nous avons exploité la technique de fixage séquentiel de la programmation linéaire pour concevoir trois procédures heuristiques polynomiales. En plus des règles énoncées ci-dessus, nous avons développé des approches qui prolongent la durée de vie sous différents objectifs. Dans le premier cas, nous avons considéré la situation où une durée de vie donnée pré définie doit être satisfaite par le réseau. De plus, le second maximise la durée de vie en n'utilisant que le nombre optimal de capteurs pour la mise en œuvre du réseau.

**Mots clés :** Réseau de capteurs sans fil, Couverture, Connectivité, Energie, Durée de vie, Programmation linaire en nombres entiers.

## Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil posent de nombreux problèmes d'optimisation complexes. Dans cette thèse, nous nous intéressons aux stratégies de déploiement qui se traduisent par un minimum de capteurs tout en assurant la couverture de la cible et la connectivité réseau. À cette fin, nous proposons des approches basées sur PLNE et une procédure heuristique rapide qui fournit des solutions de haute qualité. De plus, nous avons proposé une heuristique de prolongation de la durée de vie pour une période prédéfinie basée sur la redondance optimale des capteurs et la dégradation de la fréquence de détection. De plus, nous avons développé deux approches alternatives de déploiement assurant la k-couverture basées sur PL en nombres mixtes et nous avons exploité la technique de fixage séquentiel de la programmation linéaire pour concevoir trois procédures heuristiques polynomiales. En plus des règles énoncées ci-dessus, nous avons développé des approches qui prolongent la durée de vie sous différents objectifs. Dans le premier cas, nous avons considéré la situation où une durée de vie donnée prédéfinie doit être satisfaite par le réseau. De plus, le second maximise la durée de vie en n'utilisant que le nombre optimal de capteurs pour la mise en œuvre du réseau.

## Mots clés :

Réseau de capteurs sans fil; Couverture; Connectivité; Energie; Durée de vie; Programmation linaire en nombres entiers; Déploiement; Optimisation; Optimisation multi objectif; Coût.