



**HAL**  
open science

# Optimisation de la couverture d'une zone plane sous la contrainte de connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil

Frantz Tossa

► **To cite this version:**

Frantz Tossa. Optimisation de la couverture d'une zone plane sous la contrainte de connectivité dans les réseaux de capteurs sans fil. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Bourgogne Franche-Comté; Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2022. Français. NNT : 2022UBFCK099 . tel-04001573

**HAL Id: tel-04001573**

**<https://theses.hal.science/tel-04001573>**

Submitted on 23 Feb 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université d'Abomey-Calavi  
École Doctorale des Sciences de l'ingénieur (ED-SDI)

Université de Bourgogne Franche Comté  
École Doctorale de Sciences Physiques pour  
l'Ingénieur et Microtechniques (ED-SPIM)

Numéro d'ordre :

# Thèse de Doctorat

Présentée pour l'obtention du

**Doctorat délivré conjointement par l'Université  
d'Abomey-Calavi et l'Université de Bourgogne**

**Franche-Comté**

Spécialité : Informatique

**Optimisation de la couverture d'une zone plane sous  
la contrainte de connectivité dans les réseaux de  
capteurs sans fil**

Par :

**Frantz Muriel Ulrich TOSSA**

Soutenue publiquement le : 19 / 10 / 2022

Devant le jury composé de :

Président :	Mohamed GIBIGAYE	Professeur	Université d'Abomey-Calavi, Bénin
Rapporteurs :	Vincent ORIA	Professeur	Institut de Technologie du New Jersey, USA
	Kondo Hloindo ADJALLAH	Professeur	Université de Lorraine, France
Examineur :	Kokou ASSOGBA	Professeur	École Supérieure le Faucon, Bénin
	Michel DOSSOU	Maitre de conférences	Université d'Abomey-Calavi, Bénin
Directeurs de thèse :	Pierre GOUTON	Professeur	Université de Bourgogne, France
	Eugène Cokou EZIN	Professeur	Université d'Abomey-Calavi, Bénin
Encadrant :	Wahabou ABDOU	Maitre de conférences	Université de Bourgogne, France



*Dédicaces*

*À mon père, mon guide et modèle, sans qui, rien de tout ceci n'aurait été possible.*

*À ma mère et mes soeurs, qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années.*

*À mes enfants et à ma compagne, qui de façon extraordinaire a couvert mes arrières et m'a suivi dans mes choix parfois difficiles.*

*À tous mes amis, particulièrement ceux de l'Azizerie.*



## Remerciements

Ce mémoire marque la fin de préparation de thèse de doctorat au sein du Laboratoire Imagerie et Vision Artificielle (ImViA), de l'Université de Bourgogne (UB) et du Laboratoire d'Electrotechnique de Télécommunication et d'Informatique Appliquée (LETIA) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC).

Mes remerciements vont à l'endroit de mes directeurs de thèse, les Professeurs Eugène Cokou Ezin et Pierre Gouton et mon encadrant Docteur Wahabou Abdou, pour m'avoir encadré au cours de ces années.

Je voudrais particulièrement remercier le Docteur Wahabou Abdou qui a investi beaucoup de temps et d'efforts dans ces travaux, tout au long de ces années. Je ne saurais assez le remercier pour sa disponibilité, son soutien indéfectible et son enthousiasme scientifique qui m'ont permis de mener à bien mes travaux. J'ai eu la chance et le plaisir de travailler sous son encadrement et j'ai beaucoup appris et progressé. Merci beaucoup.

Je voudrais également remercier le Docteur Keivan Ansari, pour sa précieuse aide, son optimisme, sa disponibilité et ses encouragements, surtout dans les moments les plus difficiles.

J'adresse mes remerciements aux Professeurs Vincent Oria, Kondo Hloindo Adjallah, Michel Dossou et Kokou Assogba pour avoir accepté d'être rapporteurs et examinateur de mes travaux et au Professeur Mohamed Gibigaye qui a accepté d'évaluer ce travail en tant que Président du jury.

Je souhaite également remercier les membres des laboratoires ImViA et LETIA et l'administration des écoles doctorales ED-SDI et SPIM, pour leur pleine disponibilité et leur accompagnement.

Enfin, mes remerciements vont à l'endroit de tous mes collègues des deux laboratoires et particulièrement à Esther Chabi Adjobo, Rose Waytehad Moskolai, Elvire Houssou, Fernand Djoumessi, Yves Faga Pohowe, Vahid Mohammadi, Habib Abdourahman, Jean Kacoutchy Ayikpa, Athanase Atchome, avec qui, j'ai partagé une excellente ambiance de vie, de recherche et d'enseignement. Je nous souhaite plein succès.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>Table des figures</b>	<b>xi</b>
--------------------------	-----------

## **LISTE DES SIGLES**

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

1	Motivation . . . . .	1
2	Problématique . . . . .	2
3	Objectifs . . . . .	2
4	Contributions . . . . .	3
5	Structuration du document . . . . .	4

## **Chapitre 1**

### **ÉTAT DE L'ART SUR L'INTERNET DES OBJETS**

1.1	Introduction . . . . .	6
1.2	Brève historique de l'internet des objets . . . . .	6
1.3	Définitions . . . . .	7
1.4	Architecture . . . . .	8
1.5	Technologies de communication . . . . .	9
1.5.1	Bluetooth Low Energy (BLE) . . . . .	10
1.5.2	ZigBee . . . . .	11
1.5.3	Z-Wave . . . . .	12
1.5.4	Thread . . . . .	12
1.5.5	6LowPAN . . . . .	13

1.5.6	LoRaWan . . . . .	13
1.5.7	SigFox . . . . .	14
1.5.8	LTE-M . . . . .	14
1.5.9	NB-IOT . . . . .	15
1.6	Domaines d'application . . . . .	17
1.6.1	Ville intelligente . . . . .	17
1.6.2	Santé . . . . .	18
1.6.3	Domotique . . . . .	18
1.6.4	Surveillance de l'environnement . . . . .	19
1.6.5	Transport . . . . .	19
1.6.6	Industrie . . . . .	20
1.6.7	Agriculture . . . . .	21
1.7	Défis de l'IoT . . . . .	21
1.7.1	Sécurité . . . . .	22
1.7.2	Gestion des données générées . . . . .	22
1.7.3	Hétérogénéité . . . . .	23
1.8	Conclusion . . . . .	23

**Chapitre 2**

**DÉPLOIEMENT D'UN RÉSEAU DE CAPTEURS SANS FIL**

2.1	Introduction . . . . .	26
2.2	Nœuds capteurs . . . . .	26
2.2.1	Caractéristiques d'un nœud capteur . . . . .	26
2.2.2	Types de nœuds capteurs . . . . .	27
2.3	Types de déploiement dans les réseaux de capteurs sans fil . . . . .	28
2.3.1	Déploiement déterministe et déploiement stochastique . . . . .	29
2.3.2	Déploiement mono-objectif et déploiement multi-objectifs . . . . .	29
2.3.3	Déploiement homogène et déploiement hétérogène . . . . .	29
2.3.4	Déploiement statique et déploiement dynamique . . . . .	29
2.4	Objectifs à satisfaire lors du déploiement . . . . .	30
2.4.1	Couverture . . . . .	30
2.4.2	Connectivité . . . . .	32
2.4.3	Recouvrement . . . . .	33
2.4.4	Efficacité énergétique . . . . .	33
2.4.5	Tolérance aux pannes . . . . .	35

2.4.6	Nombre de nœuds . . . . .	35
2.5	Modèles de détection . . . . .	36
2.5.1	Modèle binaire . . . . .	36
2.5.2	Modèle probabiliste . . . . .	36
2.6	Méthodologies pour déployer . . . . .	37
2.6.1	Techniques basées sur les grilles . . . . .	38
2.6.2	Techniques basées sur la force virtuelle . . . . .	39
2.6.3	Techniques basées sur la géométrie computationnelle . . . . .	40
2.6.4	Optimisation heuristique . . . . .	41
2.7	Conclusion . . . . .	43

### **Chapitre 3**

#### **OPTIMISATION DE LA COUVERTURE DE ZONE**

3.1	Introduction . . . . .	45
3.2	Principe général de l’algorithmique génétique . . . . .	47
3.2.1	Génération de la population initiale . . . . .	48
3.2.2	Évaluation d’une solution . . . . .	48
3.2.3	Les opérateurs . . . . .	49
3.3	Quelques travaux d’optimisation de couverture de zone . . . . .	53
3.4	Définition du problème . . . . .	55
3.4.1	Hypothèses . . . . .	56
3.4.2	Formulation du problème . . . . .	56
3.4.3	Codage et fonction d’évaluation . . . . .	58
3.5	Résultats expérimentaux . . . . .	60
3.6	Conclusion . . . . .	64

### **Chapitre 4**

#### **MAXIMISATION DE LA COUVERTURE DE ZONE SOUS CONTRAINTE DE CONNECTIVITÉ DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL**

4.1	Introduction . . . . .	65
4.2	Quelques travaux relatifs à la couverture et à la connectivité . . . . .	66
4.3	Modèle de système . . . . .	69
4.3.1	Modèle de réseau et hypothèses . . . . .	69
4.3.2	Modèle de couverture et de connectivité . . . . .	70
4.3.3	Formulation de la programmation linéaire . . . . .	71

4.4	Évaluation de la couverture . . . . .	72
4.5	Évaluation de la connectivité . . . . .	74
4.6	Résultats expérimentaux et discussions . . . . .	77
4.6.1	Résultats expérimentaux . . . . .	77
4.6.2	Discussion . . . . .	78
4.7	Conclusion . . . . .	81

**Chapitre 5**

**ANALYSE DES PERFORMANCES D’UN RÉSEAU NB-IOT POUR LA SURVEILLANCE DES PATIENTS DANS LES ZONES RURALES**

5.1	Introduction . . . . .	85
5.2	Aperçu du contexte NB-IoT . . . . .	87
5.2.1	Liaison descendantes . . . . .	89
5.2.2	Liaison ascendantes . . . . .	89
5.3	Système de surveillance des soins de santé . . . . .	89
5.3.1	Méthodologie, données et modèle du système . . . . .	91
5.4	Résultats et discussion . . . . .	93
5.5	Conclusion . . . . .	93

**CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES**

	Conclusion générale . . . . .	95
	Perspectives . . . . .	96

**Listes des publications**

**Bibliographie**

## LISTE DES TABLEAUX

1.1	Tableau comparatif des technologies . . . . .	16
3.1	Paramètres de simulation. . . . .	61
3.2	Variation du taux de couverture en fonction du pourcentage de crossover. . . . .	62
3.3	Variation du taux de couverture en fonction du nombre de capteurs. . . . .	62
3.4	Variation du taux de couverture en fonction du nombre de tests. . . . .	63
3.5	Paramètres de comparaison. . . . .	63
4.1	Paramètres de simulation. . . . .	77
4.2	Pourcentage de couverture. . . . .	79
4.3	Temps de simulation. . . . .	80
4.4	Paramètres de comparaison. . . . .	84
5.1	Hypothèse de simulation . . . . .	93



## TABLE DES FIGURES

1.1	IoT : la connexion en réseau des personnes, des objets, des données et des processus [1] . . . . .	8
1.2	Modèle de référence IoT [2] . . . . .	9
1.3	Illustration d'une ville intelligente . . . . .	18
1.4	L'Iot dans le domaine de la santé . . . . .	19
1.5	Illustration d'une voiture connectée . . . . .	20
1.6	Agriculture de précision . . . . .	22
2.1	Architecture d'un noeud capteur. . . . .	27
2.2	Rayon de communication et rayon de détection. . . . .	28
2.3	Couverture de barrière . . . . .	31
2.4	Couverture de cibles . . . . .	32
2.5	Couverture de zone . . . . .	32
2.6	Déploiement sans recouvrement des faisceaux de couverture des noeuds capteurs. . . . .	34
2.7	Déploiement avec recouvrement des faisceaux de couverture des noeuds capteurs. . . . .	35
3.1	Déroulement d'un algorithme génétique. . . . .	49
3.2	Population, chromosome, gène. . . . .	50
3.3	Unique point de croisement. . . . .	52
3.4	Double points de croisement. . . . .	52
3.5	Couverture de trois capteurs superposés . . . . .	57
3.6	Couverture de quatre capteurs superposés . . . . .	58
3.7	Structure du chromosome . . . . .	58
3.8	Déploiement initial . . . . .	61
3.9	Déploiement final . . . . .	62
3.10	Position finale des capteurs . . . . .	63

*Table des figures*

---

4.1	Zone à couvrir dans une grille. . . . .	70
4.2	Deux capteurs non connectés . . . . .	71
4.3	Deux capteurs connectés. . . . .	71
4.4	Réseau non connecté. . . . .	75
4.5	Réseau connecté. . . . .	75
4.6	Premier cas de déploiement. . . . .	78
4.7	Premier déploiement sur une zone de forme irrégulière. . . . .	79
4.8	Deuxième déploiement sur une zone de forme irrégulière . . . . .	80
4.9	Troisième déploiement sur une zone de forme irrégulière. . . . .	81
4.10	Déploiement avec une zone sans intérêt. . . . .	82
4.11	Déploiement avec deux zones sans intérêt. . . . .	83
4.12	Déploiement comparatif. . . . .	83
5.1	Mode de fonctionnement du NB-IoT [3] . . . . .	88
5.2	Aperçu du modèle proposé . . . . .	90
5.3	Déploiement autonome et en bande . . . . .	91
5.4	Débit en mode autonome et en bande . . . . .	94
5.5	Nombre de patient par cellule . . . . .	94

## Résumé

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est constitué d'un ensemble de petites unités (nœuds capteurs) autonomes qui interagissent via des liens de communication construits par leurs modules de communication. Les RCSFs sont présents dans plusieurs domaines et ont généralement pour rôle d'observer leur environnement, capter des informations et de gérer ces informations en fonction de leur capacité de calcul et/ou de stockage. Cependant, vu les capacités limitées des nœuds capteurs, les RCSFs font face à de nombreux problèmes d'optimisation dont l'un des premiers est le déploiement. Dans cette thèse, nous nous concentrons donc sur les problèmes de déploiement et de connectivité dans les RCSFs. Plusieurs travaux proposent des solutions de déploiement qui se limitent à des zones régulières, ne prennent pas en compte la redondance de recouvrement des capteurs déployés et n'assurent pas la connectivité. Dans nos travaux, nous cherchons à maximiser la couverture de zone des capteurs déployés, tout en garantissant une connectivité entre ces derniers, quelle que soit le type de zone de déploiement (zone régulière ou non). Avec un nombre définis de capteurs et en tenant compte des recouvrements possibles qui peuvent survenir, nous déployons dans un premier temps dans une zone de dimensions régulières. Nous optimisons la couverture des capteurs à l'aide d'un algorithme génétique et proposons une fonction d'évaluation qui utilise des méthodes de traitement d'image, nous permettant de calculer sans biais la couverture des capteurs. Avec cette méthode, nous améliorons la couverture de zone et atteignons un taux de couverture de 88%. Après avoir efficacement couvert les zones de formes régulières, nous nous intéressons à des zones de formes irrégulières. En plus de maximiser la couverture, nous ajoutons la contrainte de connectivité totale entre les capteurs déployés. La fonction d'évaluation proposée est modifiée et complétée pour maximiser la couverture à l'intérieure de la région de déploiement, minimiser la couverture à l'extérieur et prendre en compte la connectivité totale entre les noeud capteurs. Ce qui donne lieu a un problème d'optimisation multi-objectifs. Enfin, nous introduisons à l'intérieur de la région de déploiement, des zones de « non-intérêt » qui doivent être évitées pendant le déploiement. Dans ces cas, nous atteignons un taux de couverture de 99% tout en maintenant la connectivité constante entre les capteurs. Les résultats obtenus montrent l'efficacité des solutions proposées et celles-ci sont comparées à des travaux de la littérature.

**Mots-clés:** Réseaux de capteurs sans fil, Couverture de zone, Connectivité, Algorithme génétique, Internet des Objets.

# Abstract

A wireless sensor network (RCSF) consists of a set of small autonomous units (sensor nodes) that interact via communication links built by their communication modules. RCSFs are present in several areas and generally have the role of observing their environment, collecting information and managing this information according to their computing and/or storage capacity. However, given the limited capabilities of sensor nodes, RCSFs face many optimization problems, one of the first of which is deployment. In this thesis, we therefore focus on deployment and connectivity issues in RCSFs. Several works propose deployment solutions that are limited to regular areas, do not take into account the overlapping of the deployed sensors and do not ensure connectivity. In our work, we seek to maximize the area coverage of the deployed sensors, while ensuring connectivity between them, regardless of the type of deployment area (regular area or not). With a defined number of sensors and taking into account the possible overlaps that may occur, we initially deploy in an area of regular dimensions. We optimize the sensor coverage using a genetic algorithm and propose an evaluation function that uses image processing methods, allowing us to calculate the sensor coverage without bias. With this method, we improve the area coverage and reach 88% of a coverage rate. After having effectively covered the areas of regular shapes, we are interested in areas of irregular shapes. In addition to maximizing the coverage, we add the constraint of total connectivity between the deployed sensors. The proposed evaluation function is modified and completed to maximize the coverage inside the deployment region, minimize the coverage outside and take into account the total connectivity between the sensor nodes. This leads to a multi-objective optimization problem. Finally, we introduce inside the deployment region, « non-interest » areas that must be avoided during the deployment. In these cases, we achieve 99% of a coverage rate while maintaining constant connectivity between sensors. The results obtained show the effectiveness of the proposed methods with respect to those of the literature.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks, Area Coverage, Connectivity, Genetic Algorithm, Internet Of Things.

## LISTE DES SIGLES

ADC	Analog to Digital Converter
AMXO	Arithmetic Crossover Method
AODV	Ad hoc On-Demand Vector Routing
BLE	Bluetooth Low Energy
BPSK	Binary phase-shift keying
BR	Border Router device
ED	End Device
FED	Full End Device
FDD	Full Function Device
FTD	Full Thread Device
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSK	Frequency-shift keying
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GPS	Global Positioning System
GSMA	Global System for Mobile communication Association
IDDT-GA	Improved Dynamic Deployment Technique based-on Genetic Algorithm

IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IUT	Union Internationale des Télécommunications
IGRC	Improved grid-based joint routing and charging algorithm
ISM	Industrial Scientific Medical
ISO	International Organization for Standardization
IoT	Internet of Things
LGWO	Lévy-embedded GWO
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LR	Leader Router
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network
LTE-M	Long-Term Evolution for Machines
MCSDP	Maximum Coverage Sensor Deployment Problem
MED	Minimal End Device (MED)
MTD	Minimal Thread Device
NB-IoT	Narrowband IoT
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OX	Order Crossover
PAN	Personal Area Network
PMX	Partially Matched Crossover
PPX	Precedence Preserving Crossover
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
REED	Router Eligible End Device
RFD	Reduced-Function Device

RSX	Reduced Surrogate Crossover
SIG	Special Interest Group
SED	Sleepy End Device
SUS	Stochastic Universal Sampling
SX	Shuffle Crossover
TIC	Technologies de l'Information et de la communication
UNB	Ultra Narrow Band
VFA	Virtual Force Algorithm
VFLGWO	Virtual Force-Lévy-embedded Grey Wolf Optimization
VSGCA	Virtual square grid-based coverage algorithm
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Networks
3GPP	Third Generation Partnership Project

## Sommaire

---

<b>1</b>	<b>Motivation</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Problématique</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Objectifs</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Contributions</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Structuration du document</b> . . . . .	<b>4</b>

---

## 1 Motivation

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), ou Wireless Sensor Networks (WSN) en anglais, sont un domaine de recherche en constante évolution, notamment avec l'émergence des technologies sans fil et de l'Internet des objets (IoT). L'IoT est un concept dans lequel différentes entités hétérogènes et communicantes appelées objets ou choses (personnes, robots ou appareils) sont connectées et distinguées par des identifiants uniques [4]. Ces entités peuvent enregistrer et transférer des données vers le réseau sans aucune intervention humaine. Le rôle de l'IoT est de traiter ces données, de les manipuler et de prendre les décisions tandis que le rôle des RCSFs est de relier le monde réel au monde numérique. Les RCSFs fournissent une communication matérielle pour transmettre et récupérer les valeurs réelles détectées par les objets connectés sans fil (nœuds capteurs). Ces réseaux, constitués d'un ensemble de nœuds captant leur environnement par des mesures, ont la capacité de les traiter localement et d'échanger les informations avec leurs voisins. Les RCSFs permettent ainsi d'obtenir de la diversité dans les mesures aussi bien spatiales que temporelles. Cette diversité permet d'une part la couverture d'un domaine de captation plus vaste et d'autre part, la communication entre nœuds capteurs. Avec différents contextes d'applications, les RCSFs suscitent un grand intérêt. Cet intérêt grandissant, permet de mettre à jour les différentes problématiques rencontrées dans la mise en œuvre

de ce type de réseau.

## 2 Problématique

Les RCSFs étant formés de capteurs/objets, possédant des capacités limitées, ils posent de nombreux problèmes d'optimisation. En effet pour assurer un rendement satisfaisant de ces réseaux, il faut que les composants fonctionnent pour atteindre les objectifs fixés lors du déploiement. Plusieurs objectifs peuvent être fixés notamment la couverture, la connectivité, le gain d'énergie, la tolérance aux pannes, etc., ou des combinaisons. Les problèmes de déploiement dont on cherche les solutions comprennent très souvent ces objectifs d'évaluation ; souvent ou parfois contradictoires, à considérer simultanément. Dans notre cas, il s'agit principalement de l'optimisation de la couverture et l'obtention de la connectivité totale quelque soit la région dans laquelle les capteurs sont déployés. Il faut donc trouver et utiliser des outils qui permettent de considérer simultanément ces objectifs. Dans la littérature, plusieurs méthodes de résolution de problèmes avec plusieurs objectifs ont été développées. Ces méthodes peuvent être principalement classées en deux : les méthodes exactes et les méthodes approchées qui se subdivisent en heuristiques et métaheuristiques [5, 4, 6, 7]. Les heuristiques sont des méthodes approximatives de résolution de problèmes d'optimisation difficiles. Elles visent à trouver une solution réalisable tout en respectant un ensemble de contraintes et de critères sans garantir l'optimalité, mais dans un temps de résolution raisonnable [5, 4, 6, 7]. Cela implique qu'il n'y a pas une seule solution optimale par rapport à tous ces objectifs en même temps. L'utilisation d'algorithmes d'optimisations pouvant prendre en compte plusieurs objectifs s'est donc vite révélée être une solution satisfaisante.

## 3 Objectifs

Dans cette thèse, nous nous intéressons au déploiement de noeuds capteurs à des fins de collecte de données à partir de ces noeuds positionnés dans l'environnement du réseau. Par conséquent, notre approche peut être appliquée à la fois aux contextes RCSF et IoT. L'objectif de cette thèse est de proposer une solution réalisant le placement adéquat des noeuds capteurs dans un RCSF tout en satisfaisant un ensemble de contraintes et d'objectifs, en utilisant un algorithme d'optimisation évolutive. De façon spécifique les objectifs sont :

- Rechercher le meilleur positionnement qui garanti la couverture maximale dans une région d'intérêt (RI) de forme régulière. Ce déploiement doit prendre en compte le fait que les aires de couverture des capteurs puissent se superposer ;
- Rechercher le meilleur positionnement qui garanti la couverture maximale dans

- une région d'intérêt de forme irrégulière ;
- Rechercher un maximum de couverture à l'intérieur de la région d'intérêt et un minimum à l'extérieur ;
- Éviter les zones non choisies à l'intérieur de la RI pour déployer ;
- Garantir la connectivité entre les capteurs déployés.

## 4 Contributions

Notre contribution globale est basée sur la proposition de méthode garantissant une optimisation du positionnement des capteurs, puis la communication entre ces derniers. Le déploiement des nœuds étant la première étape de l'installation d'un RCSF, le problème de déploiement des nœuds peut être décrit comme la recherche du bon positionnement de tous les capteurs constituant le réseau. Ces capteurs peuvent être aléatoirement dispersés initialement. L'une des premières préoccupations lors du déploiement, est donc de savoir comment positionner ces capteurs pour garantir une couverture maximale. Pour compenser la nature aléatoire du placement des capteurs, une solution longtems proposée dans la littérature, consistait à en déployer un grand nombre. Cette solution, très simple n'est cependant pas optimale même si elle peut contribuer à augmenter la tolérance aux pannes du réseau.

Nos travaux ont donc portés dans un premier temps sur la recherche du bon positionnement des capteurs en vue d'obtenir la couverture maximale de la région d'intérêt. Nous avons fait un déploiement dans une zone à forme régulière en cherchant à obtenir la couverture maximale avec un nombre donné de capteurs homogènes, en identifiant la meilleure position des capteurs. Pour ce déploiement, nous avons pris en compte le fait que les aires de couvertures des capteurs, peuvent se superposer au moment du déploiement, rendant complexe la détermination de la surface réellement couverte. Une formulation mathématique basée sur un modèle de programmation linéaire et visant à modéliser la problématique est proposée. Cette formulation identifie et explique la fonction objectif à optimiser, les variables de décision et les différentes contraintes à prendre en considération. Ces résultats ont été présentés à la vingtième Conférence Internationale sur la Science Computationnelle à Amsterdam au Pays-Bas, du 3 au 5 juin 2020 [8].

Dans un second temps, nos travaux ont portés sur une architecture optimisée qui puisse apporter une amélioration de la couverture tout en garantissant une connectivité entre les capteurs déployés. En effet plusieurs solutions ont été proposées pour répondre à ces objectifs, mais de façon séparée. L'une de nos contributions consiste à atteindre ces objectifs ensemble en proposant une double solution au problème de couverture et de connectivité. Nous avons proposé une solution qui permet le déploiement sur tout type de zone (forme régulière ou non). Dans ce déploiement, outre la maximisation de la couverture, nous avons ajouté la contrainte de connectivité entre les capteurs. Ensuite,

nous avons modifié le déploiement en introduisant des zones de « non intérêt » dans lesquelles les capteurs ne doivent pas être placés. Ce faisant, nous nous rapprochons plus des situations réelles de déploiement. Ces résultats ont été présentés dans le *Journal Sensors, MDPI*, avec comité de lecture [9].

## 5 Structuration du document

Outre l'introduction et la conclusion générale, ce document est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre présente l'état de l'art sur l'IoT. Nous commençons par présenter quelques définitions de plusieurs organismes, le modèle de référence concernant l'architecture IoT, quelques technologies de communication et les domaines d'application.

Le deuxième chapitre présente le déploiement des RCSFs. Nous avons rappelé les rôles et les architectures des noeuds capteurs, les problèmes rencontrés lors du déploiement de ces réseaux, les types de déploiement, les objectifs à satisfaire puis les méthodes utilisées pour satisfaire ces objectifs.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une solution au problème de maximisation de la couverture en proposant un algorithme génétique qui détermine les meilleures positions des capteurs et qui tient compte des possibles recouvrements qui peuvent survenir.

Le quatrième chapitre est consacré au déploiement sur des zones de formes irrégulières. Nous avons proposé une solution qui permet d'atteindre plusieurs objectifs de déploiement à savoir : maximiser la couverture à l'intérieur de la zone d'intérêt, minimiser le nombre de capteurs déployés à l'extérieur de la zone d'intérêt, garantir la connectivité totale entre les capteurs. Nous avons ensuite défini à l'intérieur de la zone d'intérêt, des zones de « non intérêts », dans lesquelles les capteurs ne doivent pas être déployés.

Enfin, le cinquième chapitre est consacré à l'analyse des performances d'un réseau NB-IoT pour la surveillance des patients dans les zones rurales du Bénin. Ce chapitre illustre les exemples donnés dans les chapitres 1 et 2 et présente une analyse détaillée du rendement propre à une application d'outil de surveillance des soins de santé dans un milieu rural. Nous utilisons pour cette analyse, la technologie NB-IoT présentée dans le 1.

# CHAPITRE 1

## ÉTAT DE L'ART SUR L'INTERNET DES OBJETS

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>1.2</b>	<b>Brève historique de l'internet des objets</b>	<b>6</b>
<b>1.3</b>	<b>Définitions</b>	<b>7</b>
<b>1.4</b>	<b>Architecture</b>	<b>8</b>
<b>1.5</b>	<b>Technologies de communication</b>	<b>9</b>
1.5.1	Bluetooth Low Energy (BLE)	10
1.5.2	ZigBee	11
1.5.3	Z-Wave	12
1.5.4	Thread	12
1.5.5	6LowPAN	13
1.5.6	LoRaWan	13
1.5.7	SigFox	14
1.5.8	LTE-M	14
1.5.9	NB-IOT	15
<b>1.6</b>	<b>Domaines d'application</b>	<b>17</b>
1.6.1	Ville intelligente	17
1.6.2	Santé	18
1.6.3	Domotique	18
1.6.4	Surveillance de l'environnement	19
1.6.5	Transport	19
1.6.6	Industrie	20
1.6.7	Agriculture	21
<b>1.7</b>	<b>Défis de l'IoT</b>	<b>21</b>
1.7.1	Sécurité	22
1.7.2	Gestion des données générées	22
1.7.3	Hétérogénéité	23
<b>1.8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>23</b>

---

## 1.1 Introduction

Internet et ses applications font désormais partie intégrante de nos différents mode de vie. Ils sont devenus des outils essentiels à tous égards. En trois décennies, Internet est devenu le moteur de profondes transformations dans la vie des individus, des entreprises, des institutions et des pays. Cette utilisation quasi systématique induit une énorme demande et de nouveaux besoins. Cet accroissement de la demande et ces nouveaux besoins ont conduit les différents utilisateurs à dépasser le concept initial d'Internet. La communication sur Internet est passée de l'interaction humain-à-humain à des interactions plus hétérogènes comme humain-à-machine ou machine-à-machine [10]. Cette évolution a progressivement conduit aux concepts de l'Internet des Objets.

L'Internet des Objets est un paradigme basé sur Internet et qui comprend de nombreuses technologies inter-connectées, afin d'échanger des informations. Il peut être défini comme un ensemble d'objets inter-connectés (humains, tags, capteurs, etc.) sur Internet, qui ont la capacité de mesurer, de communiquer et d'agir quelle que soit leur position géographique [11]. Les besoins actuels d'un meilleur contrôle, de surveillance et de gestion dans de nombreux domaines, ainsi que les recherches en cours, ont donné lieu à l'apparition et à la création de plusieurs systèmes (domaines d'application) basés sur l'IoT. Cependant, les limites des appareils associés dans l'IoT en termes de stockage, de durée de vie et de réseau font de l'IoT un perpétuel challenge.

Ce chapitre présente l'IoT, avec des définitions de plusieurs organismes, le modèle de référence concernant l'architecture, quelques technologies de communication et les domaines d'application.

## 1.2 Brève historique de l'internet des objets

Depuis la naissance d'Internet puis celle du web en 1989, l'idée de connecter des «objets» à Internet a commencé à germer. La cafetière Trojan Room est probablement la première application de ce type [12]. Dans le but de vérifier la disponibilité du café, un groupe de chercheurs, dont Paul Jardetzky et Quentin Stafford-Fraser, pointent une caméra vers une cafetière et écrivent un logiciel personnalisé (XCoffe) pour permettre à l'image de s'afficher sur tous leurs écrans. En 1990, John Romkey crée le premier «appareil» Internet, un grille-pain qui pouvait être allumé et éteint via Internet [10]. En Novembre 1993, Dan Gordon modifie le système d'origine de XCoffe pour lui permettre de répondre aux demandes Web et, avec Martyn Johnson, la connecte au web. XCoffee se transforme en première webcam [12]. Steve Mann invente ensuite WearCam, en 1994 puis en 1997, Paul Saffo donne la première brève description des capteurs et de leur plan d'action futur [13]. Toutefois, c'est en 1999, que le terme Internet des Objets (Internet of Things – IoT), a été introduit par Kevin Ashton, directeur exécutif de l'AutoId Center du Massachusetts Institute of Technology (MIT) [10, 13, 11].

## 1.3 Définitions

Plusieurs organismes de normalisation ont travaillé à proposer des définitions, l'architecture et des recommandations pour l'IoT.

- l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) à travers sa commission d'études du secteur de la normalisation des télécommunications de l'UIT (UIT-T) définit dans sa recommandation UIT-T Y.2060 [14], l'internet des objets comme « une infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en inter-connectant des objets (physiques ou virtuels), grâce aux technologies de l'information et de la communication inter-opérables, existantes ou en évolution ».
- L'Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization - ISO) et la Commission électrotechnique internationale (International Electrotechnical Commission - IEC) quant à elles, définissent l'IoT comme « une infrastructure d'objets, de personnes, de systèmes et de ressources d'information inter-connectés ainsi que de services intelligents pour leur permettre de traiter les informations du monde physique et virtuel et de réagir » [15].
- L'Internet Engineering Task Force (IETF), qui élabore et promeut les standards Internet, définit l'IoT comme faisant « référence aux appareils, limités en capacité de communication et de calcul, devenant désormais plus communément connectés à Internet, et à divers services qui s'appuient sur les capacités que ces appareils fournissent conjointement » [15].
- l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), définit l'IoT comme « un réseau autoconfigurable, adaptatif et complexe qui interconnecte les «objets» à Internet grâce à l'utilisation de protocoles de communication standards ». Les objets interconnectés ont une représentation physique ou virtuelle dans le monde numérique, une capacité de détection/actionnement, une fonction de programmabilité et sont identifiables de manière unique. Ces objets offrent des services, avec ou sans intervention humaine, grâce à l'exploitation d'une capacité d'identification, de capture et de communication de données et d'actionnement unique»[15].

Concrètement, comme l'illustre la figure 1.1, l'IoT désigne tout autant :

- des objets physiques connectés entre eux et à Internet et qui possèdent des ports d'interaction avec leur milieu (capteurs, antennes, électronique embarqué) pour une prise de décision intelligente ;
- des données exploitées de façon utiles pour la prise de décision ;
- des réseaux de communications électroniques, qui permettent de transporter les données issues des objets et de connecter les gens de manière plus pertinente ;
- des éléments informatiques, qui apportent les capacités de stockage et/ou de traitement des données pour fournir la bonne information à la bonne personne (ou machine) au bon moment.

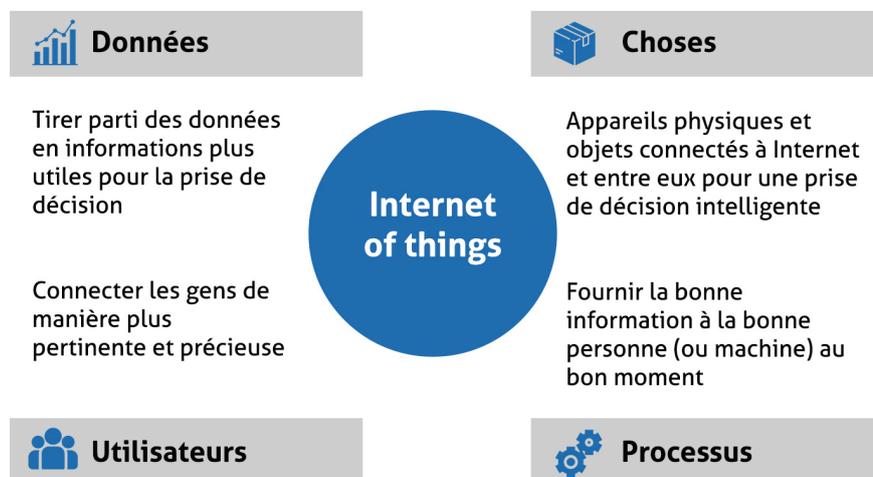


FIGURE 1.1 – IoT : la connexion en réseau des personnes, des objets, des données et des processus [1]

## 1.4 Architecture

L'IoT met en connexion le monde physique et celui numérique dans le but d'utiliser des données pour analyser, planifier, gérer et prendre des décisions intelligentes de manière autonome. Une exigence critique de l'IoT est donc l'interconnexion des éléments. Pour ce faire, l'architecture du système doit permettre de relier le monde physique et le monde numérique mais aussi, d'impliquer dans sa conception plusieurs facteurs tels que la mise en réseau, la communication, les processus, l'extensibilité, l'évolutivité et l'opérabilité entre les appareils hétérogènes qui composent le système. Cette architecture varie d'un système à l'autre en fonction surtout du contexte de son application, et peut être traitée comme un système physique, virtuel ou hybride.

Les organismes de normalisation et certains projets de recherche ont introduit plusieurs architectures. Cependant, vu le développement rapide de l'IoT, l'hétérogénéité des systèmes et le nombre grandissant de domaines d'application, il était nécessaire d'avoir une architecture de référence qui uniformise la conception des systèmes et favorise l'interopérabilité et la communication entre les différents écosystèmes. Dans ce document, nous présentons le modèle de référence IoT en couches de L'UIT-T. Ce modèle fournit une compréhension universellement commune des fonctions et capacités cruciales de l'architecture IoT, aide à réduire la complexité de la mise en œuvre et favorise l'interopérabilité entre diverses applications IoT et technologies de communication [2].

Le modèle de référence IoT présenté dans la figure 1.2 se compose de quatre couches

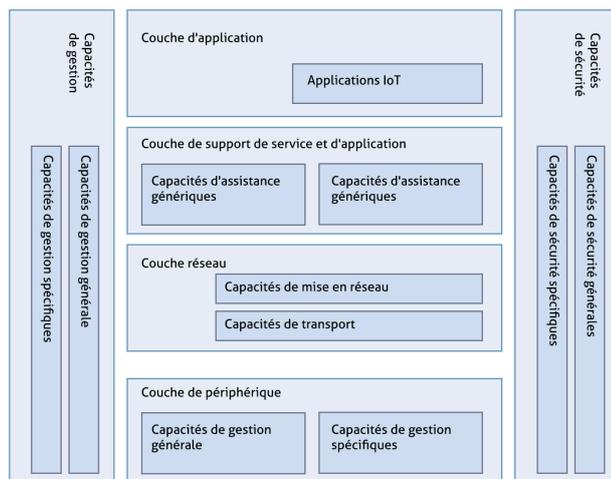


FIGURE 1.2 – Modèle de référence IoT [2]

horizontales et des capacités de gestion et de sécurité communes associées à toutes les couches [2, 16]. La couche supérieure, est celle d'application, qui contient les diverses applications IoT. C'est dans cette couche qu'on retrouvera par exemple la maison intelligente. La couche suivante, est celle de prise en charge des services et des applications, qui comprend des capacités de prise en charge génériques ainsi que des capacités de prise en charge spécifiques aux applications. Les capacités de prise en charge génériques sont des capacités communes applicables à de nombreuses applications, tandis que les capacités spécifiques à l'application répondent aux besoins spécifiques d'une application particulière. Vient ensuite la couche réseau, qui comprend les capacités de mise en réseau et de transport. Ces capacités entrent en action pour connecter les objets aux réseaux et maintenir la connectivité. Elles incluent des fonctions de contrôle d'accès, de routage, de gestion de la mobilité, d'allocation de ressources, des fonctions de transport de données ainsi que des instructions de contrôle et de gestion. La couche inférieure est la couche de périphérique, qui comprend un ensemble de capacités de périphérique et de capacités de passerelle qui permettent aux objets d'interagir avec un réseau directement ou via une passerelle. Elles sont composés de fonctions de mise en réseau de capteurs, de traduction de protocole, de sécurité et de protection de la confidentialité. Enfin, les capacités de gestion et de sécurité qui sont également classées en capacités génériques et spécifiques.

## 1.5 Technologies de communication

L'hétérogénéité des objets composant l'IoT constitue l'une des forces de ce réseau. Elle peut aussi en constituer une faiblesse, car tous les appareils formant le réseau quelle que soit leur plate-forme d'origine, doivent être connectés entre eux, pour permettre une communication. De ce fait, les protocoles de communication constituent un point essentiel

dans l'architecture IoT. Ces protocoles permettent non seulement aux appareils d'échanger des données sur le réseau, mais définissent aussi les formats d'échange et de codage des données, les schémas d'adressage des appareils et le routage des paquets de la source à la destination [16]. Ils fournissent aussi d'autres fonctions comme le contrôle de séquence et de flux, la retransmission des paquets perdus et prennent en compte l'aspect efficacité énergétique.

La connectivité sans fil est un facteur crucial pour l'IoT. Cependant, en fonction du domaine d'application, les technologies à courte portée de communication largement utilisées peuvent ne pas toujours être adaptées aux exigences d'acheminement des données sur une grande distance. Les solutions basées sur les communications cellulaires mobiles (2G, 3G, 4G et plus récemment 5G), peuvent assurer l'acheminement des données sur une grande distance, mais en revanche, elles épuisent l'énergie du dispositif. Les exigences des applications IoT ont donc conduit à l'émergence de réseau étendu à faible consommation (*Low Power Wide Area Network* - LPWAN). Les technologies LPWAN assurent une longue portée de transmission, une faible consommation d'énergie et une solution de déploiement à faible coût. Ainsi, les applications nécessitant une couverture et une mobilité totale se focaliseront sur les technologies cellulaires, telles que les technologies LTE-M et NB-IoT basées sur la 4G et sur la 5G. Les autres s'appuieront sur des technologies à faibles puissances fonctionnant dans les bandes de fréquences sans licences, et à longues portées, telles que LoRaWAN ou Sigfox, tandis que la majorité d'entre elles utilisera des technologies sans fil à courte ou moyenne portée telles que le Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee, Z-Wave, Thread, 6LowPAN, WLAN/Wi-Fi et autres. Nous commencerons par présenter les technologies sans fil à courte ou moyenne portée, puis celles fonctionnant dans les bandes de fréquences sans licences et finirons par les technologies cellulaires. Le tableau 1.1 présente un récapitulatif des principales caractéristiques des technologies présentées dans la suite.

### 1.5.1 Bluetooth Low Energy (BLE)

Basé sur la norme IEEE 802.15.1, le Bluetooth a été inventé en 1994 chez Ericsson [17], une société de télécommunications en Suède. Il a été introduit pour créer des réseaux sans fil ad hoc et à courte portée permettant à des appareils de se connecter les uns aux autres. C'est une technologie de communication sans fil à faible consommation et à faible coût adaptée à la transmission de données entre appareils mobiles sur une courte portée (8 à 10 m) [16]. La norme Bluetooth définit une communication de réseau personnel (*Personal Area Network* - PAN) et fonctionne dans la bande 2,4 GHz. Le débit de données dans les différentes versions du Bluetooth va de 1 Mb/s à 24 Mb/s. L'une des versions du Bluetooth, le Bluetooth Low Energy (BLE) est devenu une technologie prédominante pour connecter les objets dans l'IoT [18]. Contrairement au Bluetooth classique, le BLE, commercialisé sous le nom de Bluetooth Smart, est destiné aux réseaux de capteurs en mettant plus l'accent sur une consommation d'énergie réduite, avec un débit de données limité jusqu'à

1 Mbit/s. Il a été introduit en 2010 dans le cadre de la spécification Bluetooth 4.0 [16, 17, 19]. Le BLE est incompatible avec le Bluetooth classique et fonctionne aussi dans la bande de fréquence 2,4 GHz mais avec un ensemble différent de canaux avec saut de fréquence. Le BLE est basé sur une radio à saut de fréquence pour combattre l'interférence et les évanouissements fréquentiels et procure de nombreuses porteuses FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*). Une modulation simple (*Gaussian Frequency Shift Keying* – GFSK) est adoptée pour diminuer la complexité de la radio. Pendant longtemps, BLE se limitait à connecter seulement deux appareils, mais en juillet 2017, Bluetooth SIG, qui maintient et commercialise la technologie a introduit la topologie maillée permettant une communication plusieurs-à-plusieurs [19].

### 1.5.2 ZigBee

Pour coller aux capacités des dispositifs IoT, il est d'usage que les quantités de données transmises soit généralement petites. En effet les problèmes de réalisation d'applications liées aux dispositifs IoT sont assez différents de ceux associés aux terminaux de réseaux traditionnels. De ce fait, par les caractéristiques qu'il présente, un protocole de communication sans fil comme ZigBee est idéal. ZigBee est un standard ouvert de réseau personnel sans fil à faible débit (*Low-Rate Wireless Personal Area Network* - LR-WPAN) maintenu par la ZigBee Alliance. Il a été développé spécifiquement pour les besoins IoT en plus de la norme IEEE 802.15.4. IEEE 802.15.4 est une norme de réseau personnel sans fil (*Wireless Personal Area Network* - WPAN) à faible puissance et à faible vitesse qui présente une configuration typique avec une portée de 10 m à 100 m, un débit de données brut de 2 à 250 kbit/s sur la bande ISM (*Industrial Scientific Medical*) de 2,4 GHz, et une modulation BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) ou O-QPSK (*Offset-Quadrature Phase-Shift Keying*) sélectionnable [20, 21, 22]. La norme IEEE 802.15.4 peut également fonctionner sur la bande 900 MHz (sub-G), avec un débit de données plus faible et une portée plus longue pouvant atteindre quelques kilomètres. Zigbee utilise une version étendue de IEEE.802.15.4 [23, 24, 25, 18], qui est une technologie de réseau sans fil standard fonctionnant à 2,4 GHz pour les applications de ciblage qui nécessitent des échanges de données relativement peu fréquents à de faibles débits de données sur une zone restreinte et dans un rayon de 100 m, comme dans une maison ou un bâtiment [26]. Il existe deux types d'appareils dans ZigBee : l'appareil à fonction complète (*Full Function Device* - FFD) qui prend en charge toutes les opérations ZigBee et l'appareil à fonction réduite (*Reduced-Function Device* - RFD) qui est un appareil très simple qui ne peut communiquer qu'avec les FFD [19]. Ces dispositifs peuvent être organisés en topologies en étoile, en maillage ou en arbre de cluster [19, 24].

### 1.5.3 Z-Wave

La technologie Z-Wave est sous le patronage de la Z-Wave Alliance associant les vendeurs des appareils. L'alliance promeut l'utilisation de la technologie et fournit la certification des produits Z-Wave pour assurer l'interopérabilité. Bien que le support complet et la documentation technique ne soient fournis qu'aux membres de l'alliance, il existe une couche d'interopérabilité publique disponible depuis septembre 2016 et dont la documentation est publiée par Sigma Designs, le propriétaire du protocole Z-Wave [19, 27]. Le réseau se compose d'un maximum de 232 appareils connectés dans une topologie maillée à routage source [19, 18]. Les appareils servent de contrôleurs (l'un d'eux doit être le contrôleur principal) et d'esclaves (serrures de porte, ampoules, thermostats, etc.) répondant (ou renvoyant) aux demandes des contrôleurs. Tous les contrôleurs peuvent communiquer avec tous les périphériques. Cependant, seul le contrôleur principal peut ajouter de nouveaux périphériques (à l'aide d'un processus d'appariement), supprimer certains périphériques et maintenir la table de routage nécessaire pour trouver le chemin entre le contrôleur et l'esclave [19, 27]. Le contrôleur principal attribue également son ID de domicile unique au réseau. La distance entre deux nœuds communicants peut atteindre 30 à 40 mètres, mais les messages peuvent être transférés au-delà de cette plage grâce à des communications multi-saut (quatre sauts maximum) [19, 25]. Avec des débits de données allant jusqu'à 100 kbps, l'utilisation de la modulation de signal FSK (*Frequency-shift keying*) et l'utilisation d'ondes à faible énergie dans la bande de fréquence sans licence (ISM), Z-Wave est conçu pour les applications de contrôle et de détection principalement dans la domotique [19, 25, 27].

### 1.5.4 Thread

Thread est un protocole IoT publié par Thread Group Inc. en 2015. Il est destiné à être une norme ouverte, et est donc construit en incorporant de nombreuses normes. Tout comme Z-Wave, Thread est spécifiquement conçu pour la domotique [22, 28] et prend en charge une grande variété d'applications domestiques. Il fonctionne généralement dans un PAN, composé de capteurs, d'actionneurs, de matériel informatique et de communication. Toutefois, il peut être utilisé sur des réseaux de grande taille avec des dispositifs à faible puissance. Thread fonctionne sur une fréquence de 2450 MHz et est basé sur la norme IEEE 802.15.4. Bien que la norme IEEE 802.15.4 couvre les spécifications pour 2450 MHz et 868/915 MHz, Thread ne prend pas en charge 868/915 MHz et ne requiert que la prise en charge des spécifications de la norme IEEE 802.15.4 relatives à 2450 MHz. Thread utilise une modulation O-QPSK et a un débit de données allant jusqu'à 250 Kbps. Les signaux radio Thread ont une portée maximale de 30 m par saut, avec une limite de 36 sauts par défaut [21, 22]. L'un des points forts de Thread est de ne pas avoir de point de défaillance unique grâce à l'utilisation d'une topologie de réseau maillé avec 6LoWPAN, dans laquelle chaque nœud peut agir comme nœud maître et, où il n'y a pas de limite aux

nœuds connectés grâce à l'utilisation d'IPv6 [21, 22, 28]. Pour qu'un équipement puisse faire partie d'un PAN Thread, il doit être mis en service par le protocole MeshCoP (*Mesh Commissioning Protocol*), qui permet d'authentifier, de mettre en service et de joindre en toute sécurité de nouveaux dispositifs radio non fiables à un réseau maillé. Chaque nœud du réseau est d'un type et a un rôle précis qui sont transformables, en fonction des capacités du dispositif de nœud et des exigences du PAN.

### 1.5.5 6LoWPAN

6LoWPAN est une norme ouverte développée par l'IETF. Il s'agit d'une couche d'adaptation IPv6 fonctionnant au-dessus de la norme IEEE 802.15.4 [20, 18]. La portée et le débit de données dépendent de la bande de fréquences, de l'environnement et du matériel utilisé. 6LoWPAN apporte IPv6 aux réseaux IoT contraints, en réutilisant les protocoles TCP/IP éprouvés sur l'IoT. Il encapsule efficacement les longs en-têtes IPv6 dans de petits paquets IEEE802.15.4, qui ne peuvent pas dépasser 128 octets. Il prend également en charge les adresses de différentes longueurs, la faible bande passante, différentes topologies, notamment en étoile ou en maillage, la consommation d'énergie, le faible coût, les réseaux évolutifs, la mobilité, le manque de fiabilité et le long temps de veille [18]. Puisqu'il s'agit d'une norme basée sur le protocole IP, elle peut être connectée directement à un autre réseau IP sans entités intermédiaires telles que des passerelles de traduction. L'IPv6 a été choisi comme tissu de 6LoWPAN en raison de l'espace d'adressage IPv4, actuellement largement utilisé, qui utilise des adresses de 32 bits, ne compte pas plus de  $2^{32} = 4.3 \times 10^9$  adresses et est confronté à un épuisement d'adresses. IPv6 utilise des adresses de 128 bits, ce qui permet d'obtenir jusqu'à  $2^{128} = 3.4 \times 10^{38}$  adresses. IPv6 peut donc prendre en charge le grand nombre de dispositifs IoT et de réseaux omniprésents dans un avenir prévisible.

### 1.5.6 LoRaWan

LoRaWAN a d'abord été développé par la start-up Cycleo en 2009 à Grenoble (France) et racheté 3 ans plus tard par Semtech (USA). En 2015, LoRaWAN a été normalisé par LoRa-Alliance [29]. LoRa est l'abréviation de Long-Range, une technologie de couche physique pour les systèmes de communication sans fil à longue portée et à faible puissance. La technologie LoRa fonctionne selon le protocole LoRaWAN développé par l'Alliance LoRa [30, 31, 32]. LoRaWAN est un protocole de communication à longue portée, conçu par la LoRaTM Alliance, une association ouverte et à but non lucratif. Son objectif principal est de garantir l'interopérabilité entre les différents opérateurs dans une norme mondiale ouverte. Les débits de données LoRaWAN vont de 0,3 kb/s à 50 kb/s. LoRa fonctionne dans les bandes ISM 868 et 900 MHz [16, 24]. Sa robustesse aux interférences et sa couverture à longue portée (plus de 10 km) sont rendues possibles par l'utilisation de la modulation par déplacement de fréquence FSK  $\mathcal{M}$ -ary (symétrique pour la liaison

montante et la liaison descendante ) [33], et de la modulation par étalement du spectre chirp (*Chirp Spread Spectrum - CSS*), une technique dans laquelle le signal est modulé par des impulsions chirp [24, 30, 31, 32, 29]. LoRaWAN est conçu pour les dispositifs finaux fonctionnant sur batterie. Les dispositifs finaux sont connectés au serveur du réseau central par une passerelle (également appelée concentrateur ou station de base) dans une topologie en étoile. Les dispositifs finaux se connectent à une ou plusieurs passerelles à l'aide d'une communication LoRa ou FSK à saut unique [32], tandis que les passerelles et les serveurs de réseau sont connectés à l'aide de connexions IP (*Internet Protocol*) standard.

### 1.5.7 SigFox

La technologie Sigfox a été développée en 2010 par la start-up Sigfox à Toulouse (France), où Sigfox est à la fois une entreprise et un opérateur de réseau LPWAN. Actuellement, Sigfox exploite et commercialise sa propre solution IoT dans plusieurs pays (31 au moins) et est toujours en cours de déploiement dans le monde entier grâce au partenariat avec divers opérateurs de réseau [29]. Sigfox utilise ses technologies UNB brevetées et déploie ses stations de base exclusives dans différents pays dans les bandes ISM Sub-GHz sans licence (par exemple 868MHz en Europe, 915MHz en Amérique du Nord et 433MHz en Asie). Les appareils finaux se connectent à ces stations de base en utilisant la modulation BPSK dans une bande ultra étroite de 100 Hz à un débit de données maximal de 100 kbps. En utilisant une bande ultra étroite dans le spectre Sub-GHz, Sigfox utilise efficacement la bande de fréquences et présente des niveaux de bruit très bas, ce qui permet une consommation d'énergie très faible, une sensibilité élevée du récepteur et une conception d'antenne à faible coût. À l'origine, Sigfox ne soutenait que la transmission en liaison montante, mais il a ensuite été étendu à la communication bidirectionnelle. La transmission en liaison descendante ne se produit qu'après une transmission en liaison montante.

### 1.5.8 LTE-M

Le Third Generation Partnership Project, (3GPP) est un accord de collaboration datant de décembre 1998 qui rassemble un certain nombre d'organismes de normalisation des télécommunications pour le développement des réseaux mobiles de troisième génération, en produisant et publiant les spécifications techniques pour les réseaux mobiles de 3ème (3G), 4ème (4G) et 5ème (5G) générations [34]. Dans le cadre de la 4G LTE, le 3GPP a spécifié deux technologies LPWA pour l'IoT : LTE-M et Narrowband IoT (NB-IoT). LTE-M est destinée aux applications IoT de milieu de gamme et peut prendre en charge les services vocaux et vidéo, tandis que NB-IoT peut fournir une couverture très profonde et prendre en charge les appareils à très faible coût [29, 35, 36]. En tant que technologie LPWAN, LTE-M prend en charge un large éventail d'applications IoT. Elle est principalement destinée aux applications IoT qui nécessitent des débits de données

comparativement élevés, une faible consommation d'énergie, une faible latence, la mobilité et une large couverture. La fonctionnalité de voix sur LTE (VoLTE) est également prise en charge. LTE-M bénéficie de toutes les fonctions de sécurité et de confidentialité des solutions 3GPP. En raison de sa gamme de performances, de sa couverture, ainsi que de l'utilisation de la norme LTE comme base [29, 35, 36, 37], la LTE-M est une technologie LPWAN qui peut s'appliquer à un grand nombre de cas d'utilisation de l'IoT. Elle dispose d'une architecture, qui propose des débits de données variables pour prendre en charge une variété d'applications et de cas d'utilisation. Elle peut prendre en charge un nombre considérable de dispositifs, allant jusqu'à 100.000 dispositifs ou plus par station d'accès.

### 1.5.9 NB-IOT

Encore appelé LTE-M2, le NB-IoT (*Narrowband IoT*) est une technologie LPWAN à bande étroite spécialement conçu pour l'IoT et développé par 3GPP et basée sur LTE. Elle peut coexister avec LTE ou le GSM dans des bandes de fréquences sous licence, et normalisée par le projet de partenariat de troisième génération (3GPP) [29, 35, 36, 38, 1, 3]. NB-IoT occupe une bande passante de 200 KHz, ce qui correspond à un bloc de ressources dans la transmission GSM et LTE [29, 39]. Avec cette sélection de bandes de fréquences, trois modes de fonctionnement sont possibles. Il s'agit du fonctionnement autonome dans lequel il est possible d'utiliser des bandes de fréquences GSM ; du fonctionnement en bande de garde dans lequel, les des blocs de ressources inutilisés dans la bande de garde de la porteuse LTE sont utilisés ; et le fonctionnement en bande pour lequel les blocs de ressources de la porteuse LTE sont utilisés [29, 40, 38, 3]. NB-IoT permet la connectivité de plus de 100.000 appareils par cellule et cette capacité peut être augmentée en exploitant plusieurs porteuses NB-IoT [29, 40]. NB-IOT utilise la modulation QPSK, l'accès multiple par répartition en fréquence (*Frequency Division Multiple Access - FDMA*) en liaison montante et l'accès multiple par répartition orthogonale (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA*) en liaison descendante [29, 39]. Le débit maximal est de 200 kbps et 20 kbps sur la liaison descendante et la liaison montante respectivement, avec 1600 octets de charge utile dans chaque message [29, 40]. NB-IoT réduit au minimum les fonctionnalités du protocole LTE et les améliore en fonction des besoins des applications IoT. Avec la NB-IoT, le système dorsal utilisé par LTE pour diffuser des informations valables pour tous les appareils finaux dans une cellule est totalement réduit et optimisé. Des messages de données de petite taille et peu fréquents sont envoyés en évitant les fonctions qui ne sont pas nécessaires à l'IoT (mesures de la qualité radio, l'agrégation, etc.) [29].

TABLE 1.1 – Tableau comparatif des technologies

Technologies	Standard	Bande de fréquence	Modulation	Débit de données	Portée	Topologie	Energie
BLE	IEEE 802.15.1	2.4 GHz	GFSK	10 kbps	8-10 m	Maillée	Très faible
ZigBee	IEEE 802.15.4	868/915 MHz et 2,4 GHz	BPSK (902-928 MHz), QPSK (2,4 GHz)	250 kbps	< 1 km	Etoile, Arbre et Maillée	Faible
Z-Wave	Z-Wave Alliance	868 MHz	FSK	100 kbps	30-40m	Maillée	Faible
Thread	IEEE 802.15.4	2.4 GHz	O-QPSK	250 Kbps	30m	Maillée	Faible
6LowPAN	IEEE 802.15.4	2.4 GHz	BPSK ou O-QPSK	250 kbps	10-100 m	Etoile -Maillée	Faible
LoRaWan	LoRa Alliance	915-928 MHz	FSK et CSS	50 kbps	5-20 Km	Etoile	Faible
SigFox	Collaboration ETSI	868 et 915-928 MHz	BPSK	100 kbps	10-40 Km	Cellulaire	Faible
LTE-M	3GPP	800 MHz		1-4 Mbit/s	1-10 Km	Cellulaire	Faible
NB-IOT	3GPP	700,800,900 MHz	QPSK	200 kbps	1-10 Km	Cellulaire	Faible

## 1.6 Domaines d'application

L'IoT est très vite devenue une technologie prometteuse qui s'est développée de manière significative et rapide. En 2008, il y avait déjà plus d'objets connectés à l'Internet que de personnes [18]. Selon le *Journal du Net*, en 2020, chaque personne a créé 1,7 Mo de données par seconde, et d'ici 2025, ce chiffre pourrait monter à 463 exaoctets de données générées chaque jour au total [41]. Selon une étude de la *Global System for Mobile communication Association* (GSMA), l'association professionnelle des opérateurs de réseaux mobiles, le marché mondial de l'Internet des objets s'élèvera à 1100 milliards de dollars à l'horizon 2025, et le nombre total de connexions IoT (cellulaires et non-cellulaires) à l'échelle mondiale atteindra 25,2 milliards en 2025, contre 6,3 milliards en 2016 [42]. En 2025, les solutions liées à l'IoT et utilisées au sein des entreprises, représenteront plus de 13,8 milliards de connexions et les connexions IoT des applications grand public seront de l'ordre de 11,4 milliards [42]. Ces chiffres s'expliquent par la capacité de l'IoT à connecter les objets du quotidien. Dans cette section, nous allons présenter quelques domaines d'applications de l'Internet des objets.

### 1.6.1 Ville intelligente

Le concept de la ville intelligente, de l'anglais *smart city*, désigne des politiques utilisées pour décrire la meilleure utilisation des ressources publiques, l'augmentation de la qualité du service présenté aux citoyens, et en même temps la réduction des coûts opérationnels des administrations publiques. Pour simplifier, une ville est dite intelligente lorsqu'on utilise dans cette ville divers types de technologies numériques et électroniques pour transformer les environnements de vie. S'il est accepté que d'ici 2050, il est attendu que 66 % de la population mondiale vive dans des régions urbaines [43], le défi à relever consistera donc à fournir à cette population des ressources essentielles comme l'énergie en quantité suffisante, l'eau potable et des aliments sains, tout en garantissant une durabilité économique, sociale et environnementale totale [18, 43]. Ainsi, l'internet des objets offre plusieurs solutions pour la gestion et l'optimisation des services publics (santé, transport, éclairage, surveillance entretien des espaces publics, collecte des ordures, etc.) La ville intelligente, est un concept ambitieux qui s'affine grâce aux normes utilisées pour définir les villes intelligentes et aider à réglementer leur fonctionnement [43]. La disponibilité de différents types de données collectées par les dispositifs IoT est ensuite utilisée pour servir de base de prise de décision par les administrations territoriales. La figure 1.3 présente une illustration de la ville connectée où plusieurs entités au niveau de la ville peuvent être inter-connectés.

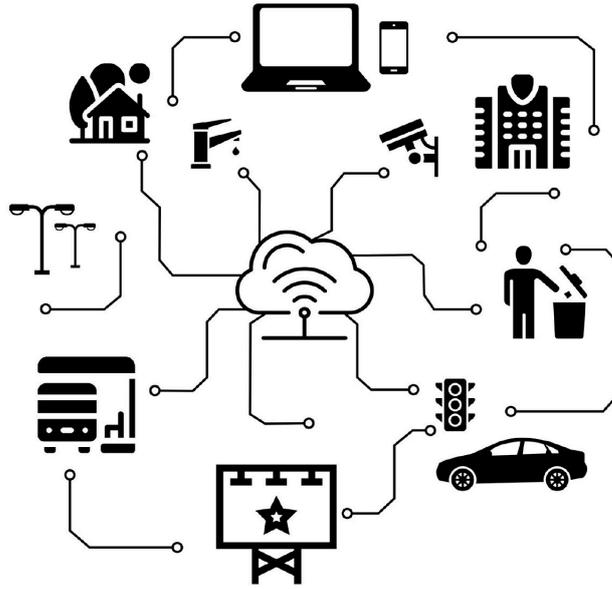


FIGURE 1.3 – Illustration d’une ville intelligente

### 1.6.2 Santé

Il existe plusieurs travaux et applications sur l’utilisation de l’IoT dans le domaine de la santé. En effet, l’utilisation généralisée des appareils mobiles, des capteurs et des réseaux de capteurs sans fil, ainsi que le développement fulgurant de l’IoT, ont incité les sociétés médicales et de soins de santé à l’utiliser pour surveiller, collecter des données et communiquer avec les patients à l’aide des réseaux corporels sans fil (Wireless Body Area Networks - WBAN) [44]. L’IoT a ainsi apporté de nombreux avantages et opportunités au domaine des soins de santé, en permettant de développer, d’améliorer et de maintenir les services de santé. Pour exemple, des ambulances peuvent être immédiatement envoyées sur les lieux d’un accident, et la santé des patients peut être suivis à leur domicile, comme l’illustre la Figure 1.4, en temps réel, aussi efficacement que dans les hôpitaux. Ainsi, un médecin peut par exemple, être immédiatement informé si un de ces patients est victime d’un malaise [40, 18]. En raison de la nature des informations collectées et de l’utilisation qui en sera faite, la sécurité et la confidentialité sont des préoccupations essentielles à satisfaire.

### 1.6.3 Domotique

La domotique est un ensemble des technologies de l’électronique de l’information et des télécommunications utilisées dans les domiciles. Elles visent à assurer des fonctions de sécurité, de confort, de gestion d’énergie et de communication qu’on peut retrouver dans

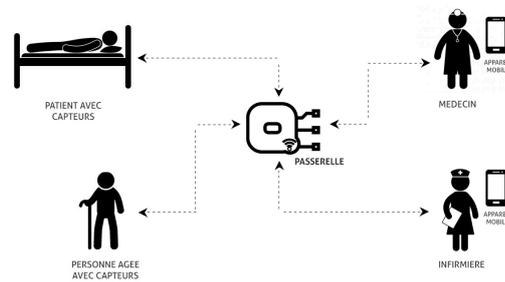


FIGURE 1.4 – L’Iot dans le domaine de la santé

une maison. Le but ultime sera de rendre une maison intelligente, en la connectant et en l’automatisant grâce à des périphériques intelligents et un protocole sécurisé. De cette façon, l’intégralité des fonctions d’une habitation allant de l’ouverture et la fermeture des volets, la gestion du chauffage, la gestion de la consommation d’énergie, le contrôle des luminaires intérieurs et extérieurs, le système de sécurité, et bien d’autres, peuvent être contrôlés. Tout cet écosystème peut être géré à distance et les appareils connectés peuvent être adaptés de manière optimale aux besoins de chaque maison.

#### 1.6.4 Surveillance de l’environnement

Les capteurs sont de plus en plus évolués et constituent aujourd’hui des éléments clés qui peuvent être mis partout pour collecter tout type d’information. À ce titre, il existe une gamme de capteurs qui fera de la surveillance environnementale. Il s’agira de mesurer la qualité de l’air par exemple et de prévenir les occupants du lieu via des applications installées sur leurs smartphones quand cette qualité atteint un niveau dangereux ou est susceptible de provoquer une maladie. Cela est utile non seulement pour l’utilisateur, mais pour aussi sensibiliser à la pollution et aux émissions élevées dans les régions peuplées et éventuellement servir de base de décisions aux décideurs. Le concept de surveillance de l’environnement peut être très vaste et inclure les voitures intelligentes et autonomes, la gestion efficace des ressources des habitations (énergie, eau, poubelle, etc.), la surveillance des sources de pollution, la surveillance de la qualité de l’eau, etc.

#### 1.6.5 Transport

Que ce soit pour les usages personnels ou professionnels, le domaine du transport n’est pas resté en marge des transformations apportées par l’IoT. Ce dernier apporte entre autre au monde du transport les voitures connectées, avec ou sans conducteur, le parking intelligent, etc. Les voitures connectées sont équipées d’un accès à l’Internet et peuvent partager cet accès avec d’autres voitures. Elles sont aujourd’hui considérées comme l’un

des meilleurs moyens de minimiser les accidents de la route, de sorte qu'un pilote peut commander la voiture à distance pour réduire les erreurs humaines. Certaines études révèlent que d'ici 2040, les voitures sans conducteur représenteront jusqu'à 75 % des voitures en circulation dans le monde [18]. Des capteurs intelligents et des caméras sont installés dans certains parkings pour détecter l'arrivée et le départ des véhicules. Ils constituent une solution de gestion efficace, en fournissant le nombre et/ou la localisation des places libres ou non, la durée d'occupation des places, les plaques d'immatriculations des véhicules garés, et, en cas de liaison avec le système d'horodateur, indique, si l'utilisateur a dépassé le temps de stationnement autorisé. Reliées à des solutions logicielles connectées, toutes ces informations permettent par la même occasion de fournir aux usagers des renseignements précis. À l'échelle des villes, des systèmes de gestion en temps réel des transports urbains basé sur l'IoT [45, 46] voient de plus en plus le jour et permettent de proposer et garantir des solutions durables pour gérer efficacement le transport urbain.

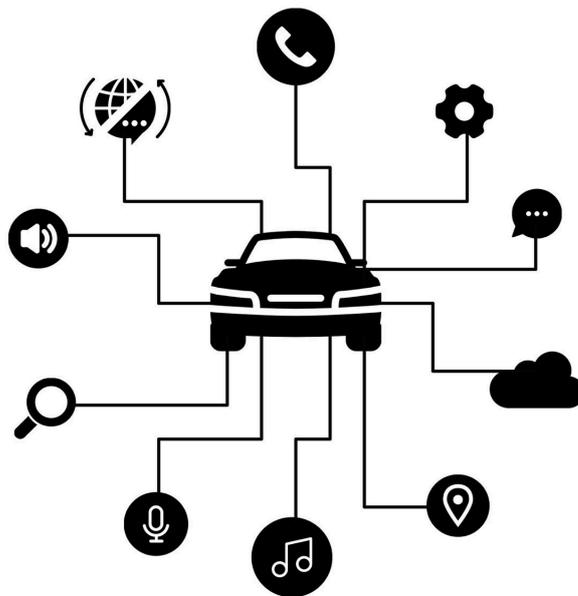


FIGURE 1.5 – Illustration d'une voiture connectée

### 1.6.6 Industrie

Le scénario industriel connaît des changements exponentiels, principalement en raison des différentes technologies qui émergent rapidement et de la demande toujours croissante. La conséquence est l'augmentation du nombre de dispositifs et de systèmes de traitement dans les architectures industrielles. La connectivité des entités, le fonctionnement conjoint physique/virtuel, l'interactivité, l'interopérabilité, l'auto-organisation, la prise de décision

intelligente, sont fondamentaux pour favoriser le potentiel de l'industrie 4.0, et l'internet industriel des objets (IIoT) y joue un rôle majeur [47]. L'IIoT permet de multiplier les points de collecte de données et de communication dans des écosystèmes logistiques complexes, tels que la gestion des actifs connectés, le suivi des dispositifs de transport, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la gestion de flotte, la gestion de stock, le géo-repérage etc. Pour des industries de plus en plus exigeantes sur la flexibilité, l'automatisation industrielle ouverte et centrée sur les logiciels peut être la solution qui permettra une production plus intelligente et plus durable.

### 1.6.7 Agriculture

L'agriculture est l'ensemble des pratiques humaines qui tendent à modifier l'environnement biologique afin d'entretenir des plantes et/ou des animaux, dans le but d'obtenir pour la consommation domestique ou pour les échanges économiques, des aliments et d'autres produits utiles. Elle fût d'abord manuelle, avant d'être révolutionnée avec l'arrivée des tracteurs et autres outils mécaniques. En raison de la demande croissante de la part de la population mondiale en nette augmentation, l'agriculture se doit d'être plus précise et les agriculteurs ont besoin d'une solution qui change leur façon de travailler. Aujourd'hui c'est donc à un autre type de révolution qu'on assiste dans le domaine agricole avec l'apport des technologies, notamment de l'IoT, qui en améliore considérablement presque toutes les facettes. Par exemple, des capteurs reliés à internet servent à collecter des mesures environnementales et mécaniques. Leur utilisation permet aux acteurs du domaine agricole de prendre des décisions avisées et d'améliorer l'ensemble de leur travail, de l'élevage à la culture des sols. En intégrant des outils agricoles intelligents dans leurs activités, les agriculteurs ont un meilleur contrôle sur le processus d'élevage et de culture, ce qui le rend plus prévisible et améliore son efficacité. En 2025, la part de marché mondiale de l'IoT dans l'agriculture devrait atteindre selon Intel, 23,44 milliards de dollars, notamment grâce à la 5G qui favorisera une meilleure connection des zones rurales [48, 49]. La détection de l'humidité et des nutriments du sol, le contrôle de l'utilisation de l'eau pour la croissance des plantes et la détermination des engrais personnalisés, la surveillance des conditions climatiques, l'automatisation des serres, la gestion des cultures, la surveillance et la gestion du bétail [18, 48, 49] sont quelques exemples d'utilisations simples de l'IoT dans l'agriculture.

## 1.7 Défis de l'IoT

L'engouement autour du "tout connecté" a entraîné l'introduction de l'IoT dans tous les secteurs de notre vie. La conséquence directe est que l'IoT est devenu un secteur en évolution fulgurante, peuplant le monde de milliards de dispositifs intelligents et créant de nouveaux types de besoins et services, allant du domaine public au domaine privé et

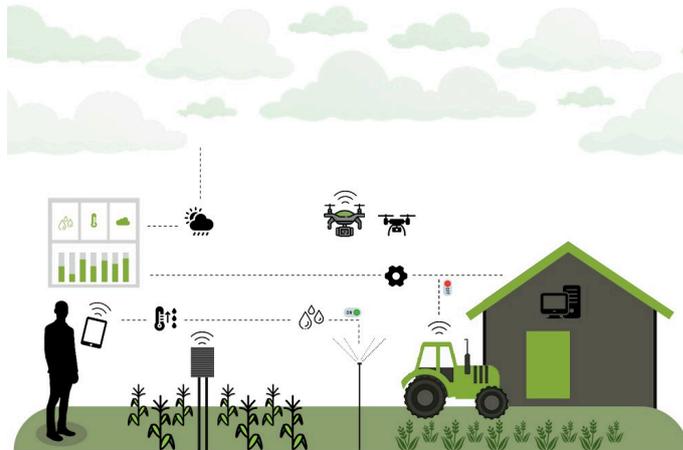


FIGURE 1.6 – Agriculture de précision

strictement personnel. De ce fait, l’IoT doit faire face à plusieurs challenges.

### 1.7.1 Sécurité

Étant donné le caractère parfois très sensible des informations collectées et transférées, la question de sécurité est primordiale et se révèle être le premier challenge auquel l’IoT doit faire face. En effet, la sécurité est un défi de longue date pour les systèmes IoT, qui présentent de nombreux vecteurs d’attaques, failles de sécurité et vulnérabilités. Les exigences primordiales de la sécurité (authentification, confidentialité, intégrité, vie privée et disponibilité) sont requises et essentielles pour toute application IoT. La sécurisation des milliards d’appareils connectés à l’IoT est donc une tâche indispensable pour exploiter pleinement le potentiel des applications IoT. Récemment, les chercheurs ont proposé de nombreuses solutions de sécurité pour l’IoT. L’apprentissage automatique (*Machine Learning* en anglais) et l’apprentissage par renforcement [50] gagnent en popularité et constituent des outils qui contribuent à la sécurisation des systèmes IoT. L’apprentissage par renforcement, contrairement aux autres techniques d’apprentissage automatique, peut apprendre l’environnement en ayant un minimum d’informations sur les paramètres à apprendre. Il résout le problème d’optimisation en interagissant avec l’environnement et en adaptant les paramètres à la volée [50].

### 1.7.2 Gestion des données générées

Le nombre important de dispositifs connectés génère une énorme quantité de données. Ces données sont très variables en termes de structure et arrivent pour la plus part en temps réel. Le volume, la vélocité et la variété font du processus de stockage et d’analyse, qui est utilisé pour générer des informations significatives, une tâche très complexe. Il est évident que l’IoT est l’une des principales sources de big data [18]. L’utilisation du

cloud computing peut faciliter le stockage de ces données pendant une longue période, cependant, la gestion de cette quantité massive de données est un problème substantiel, car l'ensemble des performances des différentes applications dépendent fortement des propriétés de ce service de gestion des données.

### 1.7.3 Hétérogénéité

Avec des objets distincts, traitant les données différemment, des impératifs de sécurité croissants et des besoins d'intégration importants, des architectures de référence doivent être proposées afin de simplifier le déploiement de projets IoT. La grande hétérogénéité des dispositifs, des plates-formes, des systèmes d'exploitation et des services qui existent et qui sont utilisés pour créer de nouvelles applications, constitue un atout pour l'IoT mais aussi un énorme défi. En effet, à mesure que l'IoT se développe, le besoin de services fonctionnant avec de multiples applications va continuer à augmenter. Cette hétérogénéité des dispositifs aux caractéristiques différentes, rend la connectivité et le processus de coordination très difficiles. Ensuite l'IoT fournit un réseau commun qui connecte presque tous les objets de notre environnement. Au fur et à mesure que le nombre de dispositif augmente, le manque d'interopérabilité entre eux peut devenir un problème critique. Bien que de nombreuses solutions aient été suggérées pour résoudre le problème de l'interopérabilité, comme la technologie des données sur les sons [51], qui code les données en plusieurs tons pour produire un code-barres sonore, qui peut ensuite être transmis et décodé par les dispositifs IoT, le problème de l'interopérabilité reste entier.

## 1.8 Conclusion

L'IoT ajoute à l'Internet traditionnel, un nouveau potentiel en permettant la communication entre les objets et entre les objets et les humains, créant un monde plus "intelligent". Considéré comme la prochaine étape de l'évolution de l'internet, l'IoT a conduit au paradigme de communications "n'importe quand, n'importe où, n'importe comment, n'importe quoi" au sens propre. Avec principalement l'aide de capteurs, l'IoT a la capacité de collecter, d'analyser et de déployer une énorme quantité de données qui sont ensuite converties en informations et connaissances significatives et utilisées pour créer de nouvelles applications ou de nouveaux services susceptibles d'améliorer notre qualité de vie. Ce chapitre a présenté un état de l'art de l'IoT. Il a abordé l'architecture en couches de l'IoT, les caractéristiques essentielles des principales technologies de communication de l'IoT, les différents domaines d'application et enfin les défis du secteur. Une comparaison entre les technologies de communication IoT courantes et les applications classiques y est également présentée. Le chapitre suivant présente le déploiement d'un réseau de capteurs sans fil (RCSF). Nous partons donc du général pour aller vers les spécificités. En effet, l'IoT existe à un niveau supérieur au RCSF. Le RCSF est souvent un sous système utilisé dans un système IoT.



## CHAPITRE 2

# DÉPLOIEMENT D'UN RÉSEAU DE CAPTEURS SANS FIL

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>Nœuds capteurs</b>	<b>26</b>
2.2.1	Caractéristiques d'un nœud capteur	26
2.2.2	Types de nœuds capteurs	27
<b>2.3</b>	<b>Types de déploiement dans les réseaux de capteurs sans fil</b>	<b>28</b>
2.3.1	Déploiement déterministe et déploiement stochastique	29
2.3.2	Déploiement mono-objectif et déploiement multi-objectifs	29
2.3.3	Déploiement homogène et déploiement hétérogène	29
2.3.4	Déploiement statique et déploiement dynamique	29
<b>2.4</b>	<b>Objectifs à satisfaire lors du déploiement</b>	<b>30</b>
2.4.1	Couverture	30
2.4.2	Connectivité	32
2.4.3	Recouvrement	33
2.4.4	Efficacité énergétique	33
2.4.5	Tolérance aux pannes	35
2.4.6	Nombre de nœuds	35
<b>2.5</b>	<b>Modèles de détection</b>	<b>36</b>
2.5.1	Modèle binaire	36
2.5.2	Modèle probabiliste	36
<b>2.6</b>	<b>Méthodologies pour déployer</b>	<b>37</b>
2.6.1	Techniques basées sur les grilles	38
2.6.2	Techniques basées sur la force virtuelle	39
2.6.3	Techniques basées sur la géométrie computationnelle	40
2.6.4	Optimisation heuristique	41
<b>2.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>43</b>

---

## 2.1 Introduction

Pendant ces dernières années, les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ont connu un nouvel essor grâce à l'avancée fulgurante de la technologie et à la miniaturisation des composants électroniques permettant d'avoir de petits systèmes disposant de mémoire, de microprocesseurs, de dispositifs de communication et de capteurs. Ces systèmes, appelés "nœuds de capteurs", sont déployés dans une zone d'intérêt pour interagir et communiquer entre eux de façon autonome. Ils forment ainsi un réseau de capteurs. Ces réseaux sont souvent constitués d'un nombre élevé de nœuds de capteurs inter-connectés par des communications sans fil via un canal radio, et sont capables de collecter et de transmettre de manière autonome des données. Les paramètres couramment surveillés sont très divers et ce type de réseau se retrouve aujourd'hui dans plusieurs domaines [40, 18, 43, 44]. Nous nous sommes donc intéressé aux problèmes soulevés par ces applications.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents types de déploiement d'un réseau de capteurs, avec une présentation des nœuds capteurs, leurs caractéristiques principales, les méthodologies de leurs déploiements et les différents objectifs à satisfaire.

## 2.2 Nœuds capteurs

### 2.2.1 Caractéristiques d'un nœud capteur

Suivant le type d'application, il existe plusieurs types de capteurs. Cependant, ils restent pour la plupart, dotés d'une architecture matérielle similaire. Un capteur est composé principalement d'une unité : de capture (d'acquisition), de traitement, de communication et d'énergie. Des composants additionnels comme un GPS (*Global Positioning System*), ou un système de mobilité, ou un générateur d'énergie [52, 53] peuvent être ajoutés selon le domaine d'application.

- L'unité de capture est composée de deux sous-unités, dont un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (*Analog to Digital Converter*). Le capteur est responsable de fournir des signaux analogiques que l'ADC transforme en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.
- L'unité de traitement est généralement un processeur couplé à une mémoire vive. Son rôle est de contrôler le bon fonctionnement des autres unités. Sur certains capteurs elle peut embarquer un système d'exploitation pour faire fonctionner le capteur. Elle peut aussi être couplée à une unité de stockage, qui servira à enregistrer les informations transmises par l'unité de capture. Cette unité peut également être dotée d'une intelligence lui permettant d'analyser/traiter les données acquises par l'unité de capture.
- L'unité de communication, elle effectue toutes les émissions et réceptions des don-

nées sur un médium sans fils. Elle peut être de type optique, ou de type radio-fréquence.

- L'unité d'énergie, généralement une batterie de petite taille et de capacité limitée. Ceci fait souvent de l'énergie la ressource la plus précieuse d'un capteur, car elle influe directement sur sa durée de vie.

L'unité d'acquisition est la partie physique qui permet de prendre la mesure, pendant que l'unité de communication, elle, se charge de la diffusion des données. Chaque nœud capteur a une portée (ou rayon) de communication ( $r_c$ ) et une portée (ou rayon) de détection ( $r_s$ ). La portée de communication  $r_c$  est la plage dans laquelle le nœud capteurs peut communiquer avec les autres nœuds, tandis que celle de détection  $r_s$  est la plage dans laquelle le nœud capteurs peut détecter l'événement [5, 52]. La figure 2.1 illustre l'architecture d'un nœud capteur et la 2.2 montre les zones définies par les deux portées.

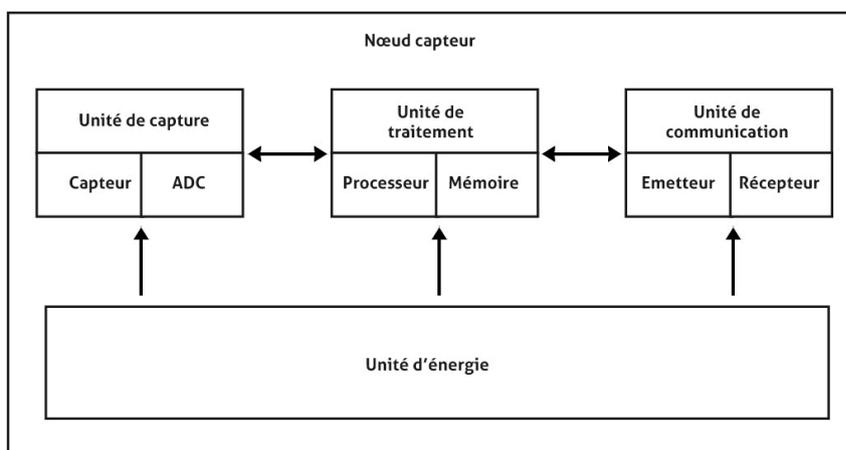


FIGURE 2.1 – Architecture d'un nœud capteur.

## 2.2.2 Types de nœuds capteurs

Selon le domaine d'application et l'architecture choisie, un RCSF peut contenir différents types de nœuds, avec chacun un rôle spécifique. On distingue [54] :

- Le nœud régulier qui dispose d'une unité de transmission et d'une unité de traitement de données ;
- Le nœud capteur ou nœud source (NS), qui est un nœud régulier, équipé d'une unité d'acquisition ou de détection ;
- Le nœud actionneur encore appelé robot qui est un nœud régulier qui dispose d'une unité grâce à laquelle il exécute des tâches spécifiques (tâches mécanique) ;
- Le nœud passerelle qui est un nœud régulier qui diffuse le trafic dans le réseau ;
- Le nœud puits qui est un nœud régulier disposant d'un convertisseur série connecté à une seconde unité de communication. La seconde unité de communication fournit

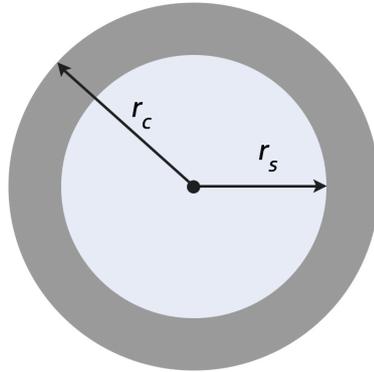


FIGURE 2.2 – Rayon de communication et rayon de détection.

une rediffusion des données venant des nœuds capteurs à un utilisateur ou à d'autres réseaux (Internet par exemple). Il est parfois appelé station de base.

Afin d'optimiser certains paramètres, comme le cycle de vie du réseau ou le temps de transmission des données, certains travaux se sont concentrés sur l'architecture plate, hiérarchique ou multi-niveaux des RCSF. En général, ces architectures déterminent le rôle de chaque nœuds dans le RCSF. Il s'agit principalement de trois rôles [55, 54] :

- Nœud Source (NS) : détecte les phénomènes se produisant dans son environnement immédiat et les diffuse soit directement soit par multiples sauts.
- Nœud Relais (NR) : réunit et relais les mesures provenant des NS. Dans une architecture à plat, un NS peut-être considéré comme un potentiel NR. Dans une architecture à 2 niveaux, un NR joue son rôle pour un ou plusieurs NS. Dans une architecture à 2 niveaux, la capacité de transmission du NR est supposée plus élevée que celle du NS.
- Nœud Collecteur (NC) de données : collecte les mesures venant des NS et, potentiellement, les agrège. En général, les NS sont regroupés en plusieurs groupes et un NC est utilisé comme chef de cluster pour chaque groupe. Les NC sont des NR.

### 2.3 Types de déploiement dans les réseaux de capteurs sans fil

Le problème du déploiement peut être décrit comme suit : disposant de  $N$  capteurs sans fil et d'une zone  $A$  à couvrir, comment placer ces capteurs pour former un RCSF qui réponde aux exigences fixées par l'application utilisée pour le RCSF. Pour répondre à ces exigences et en fonction des cas d'usages, plusieurs types de déploiement sont utilisés.

### **2.3.1 Déploiement déterministe et déploiement stochastique**

Lorsque la sélection des positions des capteurs est possible et déterminée à l'avance, on parle de déploiement déterministe. Cette approche est utilisée dans des zones accessibles et non hostiles, où les nœuds capteurs peuvent être placés dans des positions fixes et connues selon un plan prédéfini. Le déploiement déterministe a l'avantage de fournir une configuration et une vue optimale du réseau. Toutefois, de nombreuses applications RCSF doivent fonctionner dans des environnements parfois hostiles, ce qui rend le déploiement déterministe difficile voire impossible dans ces cas. Par contre, lorsque la zone d'intérêt est hostile ou inaccessible, les capteurs peuvent être par exemple largués depuis un avion et dans ce cas, on parle de déploiement non déterministe ou stochastique [5, 55, 52, 4].

### **2.3.2 Déploiement mono-objectif et déploiement multi-objectifs**

Les critères et les objectifs, sur lesquels le déploiement est optimisé, sont souvent contradictoires. C'est le cas de la couverture et de la consommation d'énergie car plus la couverture est bonne, plus la consommation d'énergie est élevée [4]. Il est difficile d'avoir un déploiement qui optimise tous les objectifs simultanément, bien qu'il existe des méthodes qui le fassent. Toutefois, il est d'usage de trouver un compromis optimal entre les différents objectifs. Selon l'approche utilisée, il est possible soit d'optimiser chaque objectif seul, soit d'utiliser une fonction d'agrégation qui combine tous les objectifs en une seule fonction avec des poids, qui représentent l'importance de chaque objectif.

### **2.3.3 Déploiement homogène et déploiement hétérogène**

Le type d'application visé lors du déploiement, déterminera s'il faut déployer des capteurs de même type (homogènes) ou de types différents (hétérogènes). Un RCSF est qualifié d'hétérogène si la distribution des capteurs est hétérogène ou si les capteurs ont des rôles différents, caractérisant ainsi une architecture hétérogène [55, 4]. Différentes applications nécessitent une variété de dispositifs qui diffèrent en nombre, en type et en rôle joué dans le réseau (certains nœuds peuvent fonctionner comme des chefs de cluster ou des passerelles vers d'autres réseaux de communication).

### **2.3.4 Déploiement statique et déploiement dynamique**

En considérant la mobilité des nœuds comme un critère, on peut distinguer deux stratégies de déploiement : le déploiement statique dans lequel les nœuds ont des positions inchangées et le déploiement mobile dans lequel les nœuds ont une capacité de se déplacer et de se repositionner après le déploiement initial [55, 4]. Dans le cas d'un déploiement statique, les meilleurs emplacements de nœuds sont choisis ou calculés en fonction de la stratégie d'optimisation, puis aucun changement de position ne se produira pendant la durée de vie du réseau. Ce type de déploiement ne prend pas en compte les changements

(comme la mobilité des cibles par exemple) au cours de l'exploitation du réseau. Cependant, dans plusieurs cas d'utilisation, il peut arriver qu'il soit nécessaire de repositionner dynamiquement les nœuds au cours du fonctionnement du réseau. Le cas d'une couverture de cibles mobiles par exemple. Le déploiement dynamique est donc une solution au problème de l'absence de garantie d'optimalité qui peut survenir lors du déploiement initial statique. Il suppose que les nœuds peuvent se déplacer de manière coordonnée dans le réseau. Cependant, le déplacement des nœuds pendant le fonctionnement du réseau est souvent coûteux et nécessite une surveillance continue de l'état du réseau et des événements qui se produisent dans le voisinage du nœud.

## 2.4 Objectifs à satisfaire lors du déploiement

Plusieurs objectifs peuvent être visés lorsque des nœuds capteurs sont déployés. Ces objectifs sont des réponses aux contraintes de conception qui doivent garantir une durée de vie optimale au réseau. Dans la littérature, la plupart des méthodes de déploiement se concentrent principalement sur des critères spécifiques tels que la couverture, la connectivité, le recouvrement, le nombre de nœuds et la consommation d'énergie et la tolérance aux pannes. En fonction des méthodes de déploiement, ces objectifs peuvent être pris en compte séparément ou simultanément.

### 2.4.1 Couverture

Assurer une bonne couverture de la région d'intérêt ou des cibles est considérée comme l'une des métriques importantes dans les réseaux de capteurs. De ce fait, la couverture dans les RCSF est largement discutée dans la littérature. La couverture est la véritable raison d'être des réseaux de capteurs. Sans elle, aucun phénomène ne peut être détecté puis transmettre en vue d'un traitement. La couverture est donc l'épine dorsale des applications de réseau de capteurs car elle mesure la relation entre ce réseau et l'environnement dans lequel il est implémenté.

La couverture reflète la qualité de la surveillance d'un point ou d'une zone par un capteur. Elle est définie comme la façon dont chaque point d'une zone d'intérêt est sous la surveillance d'un nœud capteur [56]. Dans nos travaux, nous définissons la couverture comme le pourcentage de la zone d'intérêt couverte par les capteurs déployés.

En fonction de l'application pour laquelle le réseau est déployé, différents niveaux de couverture peuvent être mis en oeuvre. Certaines applications autorisent une couverture réduite, alors que d'autres, plus critiques, nécessitent une couverture complète sur toute la durée de vie du réseau. On distingue trois types de couverture [5, 4, 52, 57, 58, 8], qui sont :

- Couverture de la barrière : l'objectif est d'obtenir une disposition des capteurs avec pour tâche de maximiser la probabilité de détection de la pénétration d'une cible

spécifique à travers la barrière. Ici, les capteurs ne sont généralement pas déployés pour détecter/suivre les événements dans une zone d'intérêt, mais pour détecter les intrus tentant de pénétrer dans cette zone. Comme le montre la figure 2.3, la barrière protectrice formée par les capteurs, garantit que tout mouvement à travers celle-ci est détecté. Ce type de couverture convient aux applications de détection de mouvement ou d'intrusion.

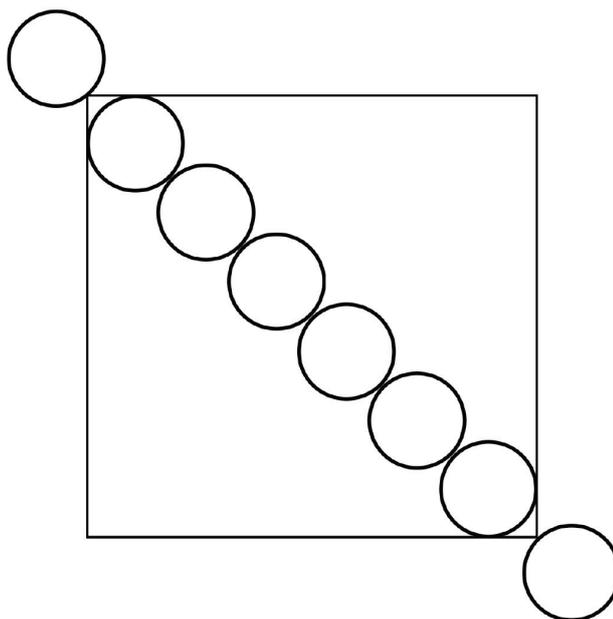


FIGURE 2.3 – Couverture de barrière

- Couverture de cibles : l'objectif est de couvrir un ensemble de cibles dont la position est connue et qui doivent être surveillées. Comme illustré par la figure 2.4, ce schéma de couverture se concentre sur la détermination des positions des nœuds capteurs garantissant une couverture efficace pour un nombre limité de cibles immobiles. Chaque cible doit être couverte par au moins un nœud capteur. La couverture d'une cible est définie comme le nombre de nœuds capteurs qui la couvrent. En conséquence, les coûts de déploiement sont inférieurs car moins de capteurs sont utilisés par rapport au nombre requis pour couvrir l'ensemble de la zone.
- Couverture de zone : L'objectif principal est de couvrir (surveiller) une région et de maximiser le taux de détection d'une zone spécifique. Selon les exigences de déploiement requises, une couverture totale ou partielle peut être demandée. Cependant, si le nombre de capteurs est insuffisant, la couverture complète ne peut pas être atteinte et l'objectif sera donc de maximiser le taux de couverture. La figure 2.5 montre un exemple de couverture de zone avec des nœuds capteurs

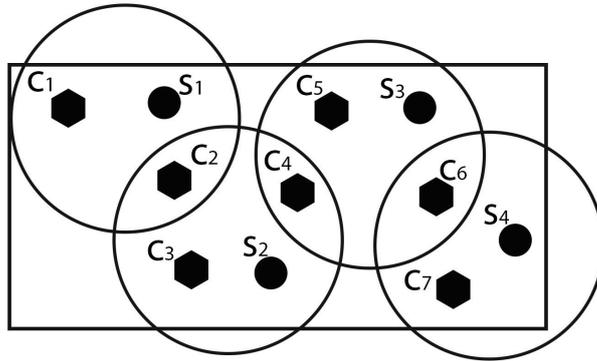


FIGURE 2.4 – Couverture de cibles

déployés.

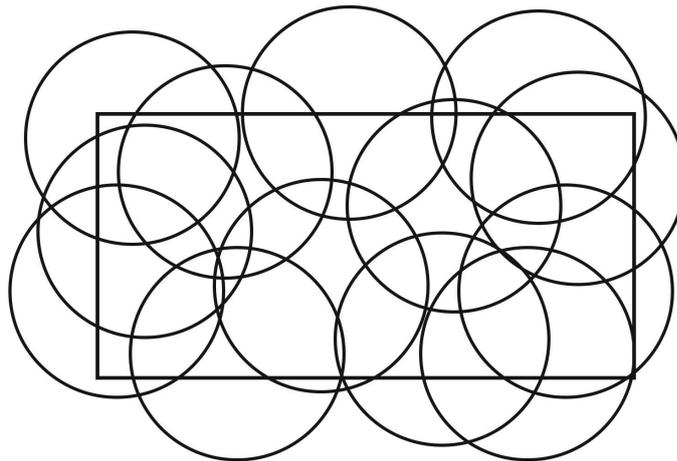


FIGURE 2.5 – Couverture de zone

## 2.4.2 Connectivité

La connectivité est un aspect important pour le réseau du point de vue des communications entre les noeuds capteurs. Lorsqu'un capteur détecte un évènement, il lui faut transmettre l'information à la station de base encore appelé noeud puits. Cette transmission peut être faite directement au noeud puits ou par l'intermédiaire d'autres noeuds du réseau.

La communication entre capteur étant sans fil dans un RCSF, il n'est pas tout de suite évident de savoir avec quels autres noeuds capteurs du réseau ils peuvent communiquer. Il faut donc construire le graphe de communication du réseau, pour en avoir une vue globale.

Chaque noeud capteur du RCSF constitue un sommet de ce graphe. Une fois construit, ce graphe permet d'évaluer la connectivité du réseau en ressortant le(s) chemin(s) allant d'un noeud capteur vers tous les autres noeuds capteurs du réseau, y compris le puits (sink).

Le réseau dans une zone définie est connecté si quelque soit la paire de noeud capteurs, il existe au moins un chemin qui les relie[9]. La connectivité du réseau est définie ainsi comme la capacité de communication entre les différents nœuds du réseau où les données sont transmises au puits par un seul ou plusieurs sauts [59]. Cette communication se fait via la portée (ou rayon) de communication ( $r_c$ ). Pour que deux noeuds capteurs soient directement connectés, la distance qui les sépare tous deux doit être inférieur ou égal à  $r_c$ . Plus généralement, deux nœuds capteurs sont connectés si et seulement si, ils peuvent communiquer directement (connectivité à un saut) ou indirectement (connectivité à plusieurs sauts)[60]. Lorsqu'un RCSF possède une connectivité unique entre les nœuds de capteurs, on parle de 1 – connectivité. La défaillance d'un seul nœud dans un tel scénario peut entraîner une défaillance de la communication dans le réseau, en le scindant en deux. Dans le cas de la  $k$  – connectivité ( $k > 1$ ), malgré la défaillance d'un nœud, le réseau reste connecté par  $(k-1)$  nombre de nœuds de capteurs.

### 2.4.3 Recouvrement

Quelque soit le type de déploiement choisi, il arrive fréquemment que le faisceaux de couverture des capteurs (représenté par les cercles dans la figure 2.6) se recouvrent.

Certains travaux [61, 62, 63, 64], privilégient le déploiement illustré par la figure 2.6 , qui exclue les recouvrements. Ce type de déploiement prévoit la juxtaposition des capteurs et ce faisant, ils assurent au maximum la couverture de la zone d'intérêt en assumant que certains points/zones soient sans couverture.

Cependant, avec ce déploiement, certains objectifs ou contraintes peuvent être difficiles à atteindre. Si la couverture est assurée de cette façon, la connectivité ne l'est pas. Certains travaux comme [65, 66, 67, 68, 69, 59] proposent des déploiements en prenant en compte des recouvrements minimums. Ce type de déploiement, illustré à la figure 2.7 est plus conforme à la réalité et permet de satisfaire certaines contraintes comme la connectivité mais peut rendre l'atteinte d'autres objectifs comme la maximisation de la couverture, plus difficile. Il convient donc de trouver un compromis en fonction des objectifs à atteindre pour le déploiement et les contraintes fixées par celui-ci.

### 2.4.4 Efficacité énergétique

Le scénario de déploiement initial est souvent basé sur un ensemble de nœuds et un nombre réduit de stations de base. La consommation d'énergie apparaît dans le déploiement comme une contrainte plutôt qu'un objectif premier. Cependant c'est une contrainte importante puisque généralement, les noeuds capteurs sont dotés de petites batteries et

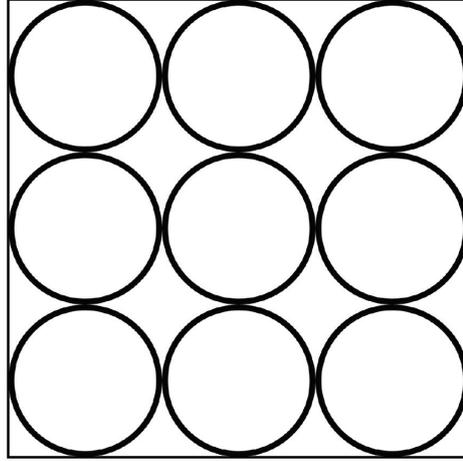


FIGURE 2.6 – Déploiement sans recouvrement des faisceaux de couverture des noeuds capteurs.

qu'ils deviennent inactifs dès que ces batteries s'épuisent. La durée de vie d'un nœud capteur est donc fortement liée à celle de sa batterie. Une batterie défaillante ou épuisée entraînera le dysfonctionnement du nœud, ce qui implique des changements topologiques et peut nécessiter une réorganisation du réseau. Selon le cas d'application, recharger ou changer les sources d'énergie peut être coûteux et parfois impossible à cause de l'environnement de déploiement. Il est donc important d'estimer l'énergie consommée par chacun des nœuds capteurs afin d'optimiser la consommation globale d'énergie du réseau. Pour augmenter la durée de vie globale du réseau, les nœuds des RCSF se doivent d'être le plus longtemps possible, autonome énergétiquement. Cela impose une gestion efficace de l'énergie pour augmenter la durée de vie de l'ensemble du réseau. La perte d'énergie dans un nœud capteur se fait durant la détection, la communication et/ou le traitement des données [54]. Dans ces processus, les communications sont en général plus coûteuses que les traitements [54]. L'économie d'énergie se fait donc principalement par deux processus : la mise en veille des capteurs pour limiter la consommation et le traitement local de l'information pour éviter des pertes dues à un surplus des communications. Des travaux comme [70, 67] se penchent de façon plus spécifique sur la consommation énergétique des RCSF en proposant des déploiements efficaces appliqués à certains domaines d'application.

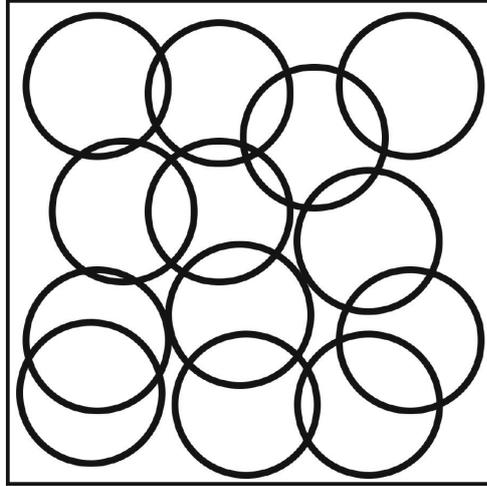


FIGURE 2.7 – Déploiement avec recouvrement des faisceaux de couverture des noeuds capteurs.

### 2.4.5 Tolérance aux pannes

Dans tous les réseaux, des dysfonctionnements peuvent survenir. Ces dysfonctionnements peuvent être de tous ordres. Les intempéries, les problèmes matériels ou une consommation excessive d'énergie par exemple, qui peuvent rendre un noeud capteur inactif et donc inutile. Cet état de chose crée un dysfonctionnement dans le réseau et peut être critique si des mesures n'ont pas été prises en amont. En conséquence, le RCSF doit être tolérant aux pannes. À cet égard, les stratégies de déploiement tolérantes aux pannes sont utilisées pour prévenir les défaillances individuelles qui minimisent la durée de vie globale du réseau. Différentes stratégies de déploiement peuvent être utilisées pour rendre le réseau plus tolérant aux pannes. Entre autres, la répartition des charges entre les nœuds, le déploiement de nouveaux nœuds et leur relocalisation, etc. Les travaux de [71] présentent une étude des travaux existants de 2002 à 2019, puis un panorama sur les protocoles de tolérance aux pannes existants avec une analyse comparative.

### 2.4.6 Nombre de nœuds

Le critère de nombre de nœuds est presque toujours une contrainte financière et parfois énergétique ou environnementale. Le nombre de noeuds à déployer est une question importante avant tout déploiement. En général, ce nombre a une forte corrélation avec l'application et les objectifs visés par le RCSF. En fonction de l'application, le nombre de noeud capteurs nécessaires peut varier. On ne déploiera pas, par exemple, ni le même

nombre, ni le même type de noeuds selon que ce soit pour une application liée à la domotique ou à la surveillance de la circulation dans une ville, ou à l'agriculture. Outre l'application du RCSF, les objectifs à atteindre sont aussi un élément déterminant, dans le calcul du nombre. Selon que l'objectif soit la couverture ou la connectivité, ou les deux, ou encore le besoin d'économiser l'énergie des capteurs, le nombre de capteurs peut considérablement jouer sur l'efficacité du réseau. Le fait d'avoir moins de capteurs peut réduire considérablement le budget du déploiement et diminuer la consommation énergétique ultérieure du réseau mais aussi avoir une incidence sur son efficacité.

## 2.5 Modèles de détection

Quelque soit le type de couverture souhaitée pendant le déploiement, elle se déduit de la couverture associée à chacun des capteurs qui forment le réseau. Il est donc nécessaire d'avoir un modèle de la couverture d'un capteur, en vue d'exprimer la couverture totale du réseau.

Ce modèle se base sur la portée (ou rayon) de détection ( $r_s$ ) du capteur et est souvent simplifié par rapport à la réalité. Deux principaux modèles de couverture reviennent dans la littérature. Le modèle déterministe ou binaire et le modèle probabiliste [5, 55, 4, 54, 72].

### 2.5.1 Modèle binaire

Le modèle déterministe est le plus simple et est très utilisé [63, 73, 61, 62, 4, 72, 74]. Dans ce modèle, la portée de détection de chaque nœud est illustrée par un disque de rayon  $r_s$  appelé rayon ou portée de détection. Il est basé sur l'idée que tous les points situés dans un disque centré sur le capteur à l'emplacement  $(x_s, y_s)$ , sont censés être couverts par celui-ci. Le centre du cercle indique donc la position du capteur et son rayon, sa portée de détection. Ainsi, un nœud capteur ne détecte que les événements qui se trouvent dans sa portée de détection. Toute zone ou tout point qui se situe en dehors de cette portée de détection n'est pas surveillé. La fonction de couverture utilisée est définie par l'équation 2.1 :

$$f(s, p) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(s, p) \leq r_s \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.1)$$

où  $d(s, p)$ , la distance Euclidienne entre le capteur  $s$  et un point  $p$  est donné par l'équation 2.2 :

$$d(s, p) = \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2} \quad (2.2)$$

### 2.5.2 Modèle probabiliste

Jugé simpliste, le modèle de détection binaire, ne prend pas en compte le facteur d'incertitude dans la mesure. Pour cette raison, certains travaux utilisent le modèle pro-

babiliste. Plusieurs types de modèles probabilistes existent, tels que les modèles de détection Elfes, Shadow Fading, Log-Normal Shadowing, Rayleigh Fading et Nakagami-m Fading [72]. Nous présenterons ici, uniquement le modèle de détection Elfes, qui est le plus rencontré dans la littérature lorsqu'il s'agit de modèle probabiliste. Dans ce modèle, le comportement de détection des noeuds capteurs est plus incertain. La distance qui sépare la cible à surveiller du noeud et les caractéristiques du noeud lui-même influencent la perception du noeud et sa capacité à détecter la cible [4, 54, 75]. La capacité de détection du noeud de capteur diminue à mesure que la distance entre le noeud et l'évènement augmente. Ce modèle révèle la performance des dispositifs de portée de détection et est affecté par divers facteurs comme le bruit, les obstacles, les interférences [5, 55, 72, 75, 74]. Ceci le rend plus réaliste et plus conforme aux déploiements en environnement réel.

Dans le modèle probabiliste, pour un capteur  $n$ , deux distances sont définies. La première distance  $r_s$ , définit une distance de détection où la cible est détectée avec une probabilité de 1 si la distance entre la cible et le noeud est inférieure à  $r_s$ . La deuxième distance,  $r_i$  représente une distance de détection incertaine, telle que  $r_i$  est plus petite que  $r_s$ . Les expressions  $r_s - r_i$  et  $r_s + r_i$  définissent un anneau dans lequel un évènement peut être détecté ou non selon la valeur de la probabilité de couverture. Un noeud pourrait alors détecter avec une probabilité  $p$  un point ou un objet se situant dans l'intervalle compris entre  $r_s - r_i$  et  $r_s + r_i$ . La probabilité de couverture d'un point  $P(x, y)$  par le capteur  $n$  est alors donnée par l'équation (2.3) :

$$C_{xy}(n) = \begin{cases} 0 & \text{si } r_s + r_i \leq d(n, P) \\ e^{-\lambda\alpha^\beta} & \text{si } r_s < d(n, P) < r_s + r_i \\ 1 & \text{si } r_s \geq d(n, P) \end{cases} \quad (2.3)$$

où  $\lambda$  et  $\beta$  sont des constantes dépendants des caractéristiques du noeud capteur et  $\alpha$  est donné par :

$$\alpha = d(n, P) - (r_s - r_i) \quad (2.4)$$

## 2.6 Méthodologies pour déployer

Il existe plusieurs méthodes pour le déploiement des capteurs. Il s'agit principalement des méthodes de déploiement classiques et des métaheuristiques [5]. Certains travaux ajoutent une troisième catégorie de méthodes basées sur des techniques d'auto-planification [74]. Les méthodes de déploiement classiques se subdivisent en trois grandes catégories : les Techniques basées sur les grilles (*Grid-Based Techniques*), celles basées sur la force (*Force-Based Techniques*) et celles sur la géométrie computationnelle (*Computational Geometry*) [5, 74].

### 2.6.1 Techniques basées sur les grilles

La stratégie basée sur la grille est un type de déploiement déterministe où les positions des nœuds de capteurs sont fixées selon un modèle de grille régulier tel qu'une grille triangulaire, une grille carrée ou une grille hexagonale. Selon l'algorithme de déploiement qui a été couramment utilisé, la zone de surveillance est divisée en petites grilles et les nœuds de capteurs sont situés au centre ou aux sommets de la grille. Le modèle de déploiement régulier des nœuds de capteurs dans la zone cible peut être considéré comme une solution appropriée pour fournir un degré acceptable de couverture et de connectivité avec un nombre minimal de nœuds. Les modèles de déploiement optimaux peuvent être obtenus en fonction de la relation entre  $r_s$  et  $r_c$  [5, 74].

Les auteurs de [6] fournissent une solution pour trouver le déploiement optimal pour avoir  $p$ -couverture et  $q$ -connectivité où  $q$  est inférieur ou égal à 6 pour certaines valeurs typiques de  $\frac{r_c}{r_s}$ . Dans ces travaux, pour différents rapports entre  $r_s$  et  $r_c$ , les auteurs ont proposé trois formes différentes, à savoir un treillis triangulaire, un treillis carré et un motif hexagonal [5, 74]. Ils comparent le nombre de nœuds capteurs nécessaires pour les modèles de déploiement réguliers afin d'obtenir une couverture de 1, 3 et 5 et une connectivité de  $q$  avec  $r_s = 30$  m en utilisant l'équation suivante :

$$N = \frac{\text{zone à couvrir}}{T_a, S_a \text{ ou } H_a} \quad (2.5)$$

où  $N$  est le nombre de noeuds,  $T_a$  est la surface triangulaire,  $S_a$  est la surface carrée et  $H_a$ , la surface hexagonale. Les auteurs de ces travaux recommandent le modèle de treillis triangulaire comme modèle de déploiement approprié dans le cas où le niveau de couverture requis est supérieur ou égal à 3, avec le rapport  $r_c/r_s \geq \sqrt{3}$  [74].

Dans [76] les auteurs proposent un algorithme de couverture basé sur une grille carrée virtuelle (*Virtual square grid-based coverage algorithm* - VSGCA). Chaque nœud capteur divise sa zone de détection en grilles carrées virtuelles. Ainsi, si toutes les grilles sont couvertes par des voisins, le nœud cible est un nœud redondant. Comparé à certains algorithmes, VSGCA assure une couverture et une connectivité dans l'ensemble de la zone d'intérêt et offre également une faible complexité spatiale de  $O(n + M)$  et une complexité temporelle de seulement  $O(n \times M)$ , inférieur à la plupart des autres algorithmes; avec  $n$  représentant le nombre de nœuds voisins et  $M$  le nombre total de points de grille pour chaque nœud capteur [6, 76]. Cependant, cet algorithme ne prend pas en compte le scénario des obstacles et la mobilité des nœuds.

Dans [75], les auteurs proposent un algorithme amélioré de routage et de chargement conjoint basé sur la grille (*Improved grid-based joint routing and charging algorithm* - IGRC). Pour équilibrer la consommation d'énergie du réseau, un chargeur mobile part de la station de base située au centre du réseau, puis utilise la méthode du plus proche voisin pour visiter les nœuds des trois anneaux carrés intérieurs. Il se déplace le long du bord des anneaux extérieurs et s'arrête à chaque sommet pour charger les nœuds des

anneaux extérieurs. Pour chaque anneau carré, le temps passé sur un point de charge donné est déterminé par le taux moyen de consommation d'énergie des nœuds situés dans l'anneau. Le temps de charge alloué à chaque anneau carré peut être calculé avec précision en fonction de différents taux de consommation d'énergie. L'IGRC garantit que chaque nœud peut reconstituer son énergie avant de tomber en dessous d'un seuil critique.

### 2.6.2 Techniques basées sur la force virtuelle

L'algorithme de force virtuelle (*Virtual Force Algorithm* - VFA) est l'un des mécanismes les plus populaires pour résoudre le problème de la couverture et du déploiement des nœuds dans les applications de réseaux de capteurs sans fil. Dans ce mécanisme, les capteurs se déplacent grâce à la force virtuelle déterminée par la position relative des nœuds voisins et la présence d'un événement [77]. La stratégie du modèle physique virtuel considère le nœud capteur comme un électron ou une molécule et utilise l'idée de forces virtuelles, qui peuvent être répulsives, attractives ou nulles [5, 4, 77, 74]. Ces forces s'exercent sur la paire de nœuds de capteurs adjacents en fonction de leur éloignement l'un de l'autre. Si la distance entre deux nœuds de capteurs adjacents est supérieure à une valeur seuil pré-calculée, la force attractive s'exercera; de même, si cette distance est inférieure à la valeur seuil prédéfinie, la force qui s'exercera sera de nature répulsive et enfin, si la distance est égale à la valeur seuil, la force nulle s'exercera. Cependant, la topologie de leur réseau global est relativement dense au centre et clairsemée sur les bords pour des raisons physiques. Dans cette stratégie, on suppose que tous les capteurs ont des capacités identiques de détection, de communication, de calcul et de mobilité. Un capteur peut communiquer avec n'importe quel autre capteur dans le rayon de communication  $r_c$ , et ils peuvent surveiller la région et collecter des données dans la plage de détection  $r_s$ . Si le réseau de capteurs a été déployé dans la topologie de l'hexagone parfait, la distance  $d$ , entre deux voisins est  $\sqrt{3} \times r_s$ . Pour communiquer donc avec les nœuds voisins, la portée de communication de chaque capteur doit être plus grande que  $\sqrt{3} \times r_s$  [77].

Afin d'améliorer efficacement la couverture d'un RCSF dans la zone de surveillance, les auteurs de [75] ont proposé un algorithme d'optimisation de la couverture pour les réseaux de capteurs sans fil avec un algorithme *Virtual Force-Lévy-embedded Grey Wolf Optimization* (VFLGWO). En pratique, ils appliquent la Virtual Force à l'algorithme *Lévy-embedded GWO* (LGWO), afin d'avoir l'algorithme VFLGWO. Cet algorithme leur permet d'obtenir un taux de couverture plus élevé de la zone de surveillance, une distribution plus uniforme des nœuds de capteurs et une distance moyenne de déplacement plus courte des nœuds de capteurs sans fil.

Tout en étant une stratégie complexe à mettre en oeuvre, la VFA offre une couverture adéquate pour la zone d'observation, tout en préservant la connectivité du réseau et en faisant face aux obstacles qui se trouvent dans la zone d'observation. Toutefois, dans cette stratégie, le nœud puits nécessite une capacité de calcul élevée, en raison du calcul des nouvelles positions. Ensuite, les performances de la VFA ne sont pas bonnes quand

il s'agit d'un RCSF hétérogène, en raison des forces virtuelles et, enfin, cette technique s'applique uniquement pour les nœuds mobiles. Pour évaluer l'uniformité de la distribution des nœuds, la VFA utilise une métrique d'évaluation appelée fonction de corrélation par paire.

### 2.6.3 Techniques basées sur la géométrie computationnelle

La stratégie de géométrie computationnelle est basée sur des objets géométriques tels que des points, des polygones et des segments de ligne [74]. À titre d'exemple, la géométrie computationnelle est utilisée pour résoudre le célèbre problème de la galerie d'art où la limite de la galerie entière est surveillée par au moins un des gardes de sécurité. Pour résoudre ce problème, il faut estimer le nombre minimum de caméras qui peuvent être placées dans un environnement polygonal afin de surveiller chaque point de l'environnement. La plupart des techniques de calcul reposent sur des motifs irréguliers, plus complexes que les motifs réguliers.

Deux des algorithmes de base les plus populaires sont la triangulation de Delaunay et le diagramme de Voronoï [5, 74], des méthodes de géométrie computationnelle utilisées dans les RCSF. Le diagramme de Voronoï est une méthode de partition de la zone d'intérêt en un certain nombre de polygones de Voronoï basés sur les distances entre les nœuds de capteurs [5, 74]. Chaque nœud occupe seulement un polygone, dont tous les points intérieurs sont plus proches de lui que de tout autre nœud. Par ailleurs, la triangulation de Delaunay est le graphique dual du diagramme de Voronoï. Elle est construite en reliant tous les deux points adjacents du diagramme de Voronoï dont les polygones partagent une arête commune. La plupart du temps, les diagrammes de Voronoï et de triangulation de Delaunay sont utilisés pour éliminer ou du moins réduire les problèmes de trous de couverture dans les RCSF.

Il existe également des algorithmes très pratiques, tels que les algorithmes basés sur Voronoï (VOR), les algorithmes basés sur les vecteurs (VEC) [5, 74], et le Mini-max [74] qui permettent de découvrir les difficultés liées aux trous de couverture. L'algorithme VEC est tiré du comportement des particules électromagnétiques et il pousse les nœuds de capteurs à s'éloigner de la zone couverte surpeuplée. Deux capteurs exercent une force répulsive lorsque la distance séparant deux nœuds est faible. Quant au VOR, il retire les nœuds de capteurs de la zone couverte peu dense. Enfin, l'algorithme Mini-max est similaire à VOR car il réduit les trous de couverture en rapprochant les nœuds de capteurs du sommet de Voronoï le plus éloigné. Mini-max choisit la position du nœud cible comme le point à l'intérieur du polygone de Voronoï qui minimise la distance au sommet de Voronoï le plus éloigné [74]. L'avantage le plus important de ces trois algorithmes est qu'il s'agit d'une approche distribuée qui peut aider le réseau à s'étendre à une grande échelle et à une grande portée. Ils assurent également le maintien de la connectivité tout en réduisant les trous de couverture. De plus, ils ont la capacité de traiter les obstacles dans la zone de surveillance. En revanche, la complexité de la détection des trous de

couverture et l'estimation des nouvelles positions des nœuds sont coûteuses. De plus, ils ont des performances médiocres sur le déploiement initial du cluster et une portée de communication plus faible.

## 2.6.4 Optimisation heuristique

En plus de la programmation mathématique, les heuristiques sont des méthodes de résolution exclusivement algorithmiques qui sont utilisées pour obtenir rapidement des solutions à tout problème décisionnel. Dans certains cas, l'utilisation des méthodes de programmation mathématique peut être d'une très grande complexité et de ce fait, ajouter un temps de calcul très long.

Une heuristique est une méthode approximative de résolution d'un problème d'optimisation. C'est un algorithme qui vise à trouver une solution réalisable tout en respectant un ensemble de contraintes et de critères sans garantir l'optimalité, mais dans un temps de résolution raisonnable [5, 4, 6, 7]. Elle consiste en une stratégie de bon sens pour bouger de façon intelligente dans l'espace des solutions, pour avoir une solution approchée, la meilleure qui soit, dans un délai de temps raisonnable [7].

Il y a deux types d'heuristiques qui sont généralement utilisées : celles de construction (méthodes gloutonnes par exemple), qui construisent de façon itérative une solution, et les heuristiques de descente, qui, à partir d'une solution fixe cherchent un optimum local. Les heuristiques utilisées sont fonction du problème à résoudre, surtout dans le choix du voisinage. La solution heuristique est considérée par un ensemble de variables de décision décrivant un système par exemple. Ces variables sont définies sur des domaines continus ou discrets [4]. S'il s'agit d'un domaine discret, on parle d'optimisation combinatoire et l'ensemble des solutions est dénombrable. Par contre, si certaines variables sont liées les unes aux autres, on parle d'optimisation continue.

Des heuristiques plus avancées ont été créées et ont débouché sur une nouvelle famille d'algorithmes appelées les métaheuristiques [7, 78]. Le but d'une métaheuristique, est de réussir à trouver un optimum global. Pour y arriver, elles parcourent l'espace de recherche tout en explorant les zones qui paraissent prometteuses ; en prenant soins de ne pas être pris au piège d'un optimum local. Les métaheuristiques sont généralement à l'exemple de processus naturels et sont de plus en plus utilisées avec d'autres méthodes d'optimisation.

Les principales métaheuristiques [7] pour la résolution des problèmes à variables discrètes sont :

- Le recuit simulé, qui va parcourir l'espace de recherche en s'autorisant de détériorer sa solution pour quitter les optima locaux. Pendant le processus, le recuit acceptera de moins en moins ces détériorations, ce qui le fera converger vers un optimum, que l'on espère global [78].
- La recherche avec tabous, à l'inverse du recuit simulé est déterministe et a une notion de mémoire. La sélection du meilleur voisin d'une solution amène l'algorithme à déceler les optima locaux ; et comme l'examen de l'espace de recherche

est fait en limitant le voisinage de la solution en rendant « tabous » certains mouvements, l’algorithme doit théoriquement examiner l’optimum global [78]. Dans [79], les auteurs ont proposé un protocole de hiérarchie de clustering adaptatif à sauts multiples et à faible consommation d’énergie. Dans leurs travaux, ils proposent une optimisation de la tête d’un cluster dans les RCSFs en travaillant sur la sélection du chemin optimal dans le routage, de manière à améliorer la durée de vie ainsi que l’efficacité énergétique du réseau. Pour obtenir de meilleurs résultats, ils ont utilisé en addition à la méthode d’optimisation par essaims de particules, la recherche avec tabous. Ceci leur a permis d’éviter les problèmes d’optima local médiocre qu’on peut rencontrer en utilisant uniquement certaines techniques méta-heuristiques, en particulier l’optimisation par essaims de particules. Ce faisant, ils arrivent à améliorer le nombre de clusters formés, le pourcentage de nœuds vivants et la réduction du taux moyen de perte de paquets et du délai moyen de bout en bout dans le RCSF.

- Les algorithmes évolutionnaires résultant de la théorie de l’évolution de Darwin, manipulent plusieurs solutions en même temps en les combinant pour constituer de nouvelles solutions. Le fait de disposer d’une population de solutions simplifie l’examen de l’espace de recherche. Les meilleures solutions seront choisies pour participer à la création de nouvelles solutions ce qui favorisera les combinaisons des « bonnes caractéristiques », et permettra de trouver un optimum global [78]. Plusieurs travaux [61, 62, 63, 73, 64, 80, 8, 65] utilisent par exemple les algorithmes génétiques dans le déploiement des RCSFs pour atteindre différents objectifs. Dans ces travaux, les auteurs proposent généralement un compromis optimal entre la couverture, la connectivité et la durée de vie du réseau. Alors que les auteurs de [61] et [62] ont travaillé sur la manière de maximiser la couverture de zone dans le déploiement de réseaux de capteurs sans fil homogènes en se basant sur un algorithme génétique efficace, les auteurs de [73] quant à eux, se sont concentrés sur un déploiement en cherchant à maximiser la couverture de cible. Dans [65], l’objectif principal des auteurs était de présenter une technique de déploiement dynamique basée sur un algorithme génétique, afin de maximiser la couverture de la zone avec le plus petit nombre de nœuds tout en minimisant les recouvrements entre les nœuds voisins. Dans [68], les auteurs ont proposé une approche par algorithme génétique pour le placement de  $k$ -couverture et de  $m$ -nœuds connectés dans les réseaux de capteurs sans fil basés sur des cibles. Étant donné un ensemble de points cibles, ils ont trouvé le nombre minimum de positions potentielles pour placer les nœuds de capteurs en respectant à la fois la couverture et la connectivité en proposant un schéma basé sur un algorithme génétique.

Parmi ces méthodes, nous avons utilisé pour nos travaux les algorithmes génétiques. Ce choix se justifie par plusieurs raisons. Les métaheuristiques de recherche locale (recherche

tabou et recuit simulé) servent à évaluer une seule solution en se déplaçant de cette solution vers une autre voisine au cours des itérations, tandis que les métaheuristiques de population (algorithme génétique par exemple) évaluent, à chaque itération, plusieurs solutions. En outre, les algorithmes génétiques sont assez utilisés dans la littérature et peuvent être combinés avec les métaheuristiques de recherche locale (à l'étape de mutation par exemple) pour rendre l'optimisation encore plus robuste.

## **2.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la problématique du déploiement des capteurs. Dans un premier temps, nous avons commencé à définir ce que c'est que le capteur, puis présenté les différentes caractéristiques et enfin les différents noeuds capteurs. Nous avons ensuite précisé les différents types de déploiement qui peuvent être fait, les objectifs à satisfaire pendant ces déploiements, et avons fini avec les modèles de détection et les méthodes pour déployer. Le chapitre suivant décrira l'application d'une des méthodes de déploiement abordée dans ce chapitre en mettant en avant la couverture comme objectif à améliorer.



## CHAPITRE 3

# OPTIMISATION DE LA COUVERTURE DE ZONE LORS DU DÉPLOIEMENT DE CAPTEURS À L'AIDE D'UN ALGORITHME GÉNÉTIQUE

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Principe général de l'algorithmique génétique</b>	<b>47</b>
3.2.1	Génération de la population initiale	48
3.2.2	Évaluation d'une solution	48
3.2.3	Les opérateurs	49
<b>3.3</b>	<b>Quelques travaux d'optimisation de couverture de zone</b>	<b>53</b>
<b>3.4</b>	<b>Définition du problème</b>	<b>55</b>
3.4.1	Hypothèses	56
3.4.2	Formulation du problème	56
3.4.3	Codage et fonction d'évaluation	58
<b>3.5</b>	<b>Résultats expérimentaux</b>	<b>60</b>
<b>3.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>64</b>

---

### 3.1 Introduction

La croissance rapide des technologies sans fil et la diminution de leur coût ont permis de généraliser l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Ces réseaux sont composés d'un ensemble de nœuds autonomes effectuant une ou plusieurs tâche(s). Ils sont constitués de petits nœuds qui se distinguent des réseaux traditionnels par leur portée de communication et de détection. Ils détectent les phénomènes physiques présents dans la

zone et transmettent les données de manière collaborative au nœud récepteur. Un nœud capteur peut, de ce fait, être un nœud de détection, de transmission ou de relais.

Utilisé à l'origine dans le domaine militaire, ce type de réseau est désormais présent dans plusieurs autres domaines [40, 18, 44, 45, 46, 47, 81, 43, 48, 49, 82, 83]. Comme nous l'avons présenté dans les chapitres 1 et 2, la plupart de ces applications ont pour tâche de surveiller un point ou une zone cible, d'enregistrer une réaction et de la transmettre. À cet effet, il arrive qu'en fonction du domaine, les applications des RCSF jouent des rôles critiques. Toutefois, en raison de leur limitation et contraintes, les RCSF sont confrontés à plusieurs problèmes. L'un d'eux est la couverture optimale d'une zone à observer. En effet, quel que soit le domaine d'application, assurer une couverture optimale du réseau reste un problème majeur dans les RCSF, surtout lorsque le nombre de capteurs est limité.

Le déploiement est donc l'un des aspects importants qui a un impact direct sur l'efficacité des réseaux de capteurs sans fil. Il affecte toutes les principales mesures de performance d'un RCSF, telles que la couverture, la connectivité et la durée de vie du réseau. Parmi ces métriques, nous nous concentrons dans ce chapitre sur la couverture. En effet, pour une conception et une utilisation efficaces des réseaux de capteurs dans divers scénarios d'application, la couverture dépend de nombreux paramètres. Elle reflète la qualité de la surveillance d'un point ou d'une zone par un capteur[56]. Dans ce chapitre, nous cherchons à couvrir une zone bidimensionnelle avec un nombre donné de capteurs en utilisant un algorithme génétique afin de trouver le meilleur placement pour assurer une bonne couverture de la zone à observer. Le problème de couverture maximale que nous abordons est basé sur le calcul de la surface totale couverte par les nœuds capteurs déployés. Tout d'abord, nous définissons le problème de la couverture maximale. Pour un nombre donné de capteurs, l'algorithme proposé trouve la meilleure position pour maximiser la couverture de la zone des capteurs.

La plupart des travaux précédents sur ce problème, se sont concentrés sur la façon de réduire le nombre de capteurs pour couvrir la zone. Dans notre cas, nous examinons le problème de la couverture maximale de la zone avec un nombre donné de capteurs du même type. Dans des situations réelles, pour des raisons de coût, le nombre de capteurs est souvent limité, mais l'exigence de couvrir une zone aussi large que possible est nécessaire. Comme indiqué dans [61], selon les objectifs, le problème de couverture peut être formulé de différentes manières. Dans cette étude, la zone d'intérêt est de forme régulière. Nous cherchons à la recouvrir en utilisant un nombre limité de noeuds capteurs, pour avoir la meilleure couverture possible. Plutôt que d'utiliser des méthodes telles que les algorithmes d'encerclement [84, 85], nous utilisons une des techniques basées sur l'optimisation heuristique [5, 74], en l'occurrence un algorithme génétique (AG). En outre, en raison du déploiement aléatoire des capteurs, qui entraîne un recouvrement probable des zones de couverture des capteurs, nous présentons dans ce chapitre, une nouvelle méthode comme fonction d'évaluation de l'algorithme génétique pour connaître la surface exacte couverte par les capteurs.

## 3.2 Principe général de l’algorithmique génétique

Les algorithmes génétiques sont un type de méta-heuristiques souvent utilisés pour résoudre des problèmes d’optimisation complexes. Les méta-heuristiques peuvent trouver des solutions raisonnables avec moins d’effort de calcul et donc en temps relativement plus court, que les méthodes itératives ou les heuristiques simples. Par conséquent, ce sont des approches pratiques pour les problèmes d’optimisation. Dans le domaine de l’optimisation combinatoire, Padula et Kincaid [86] ont décrit plusieurs méthodes d’optimisation combinatoire telles que la recherche tabou (TS), le recuit simulé (SA) et l’algorithme génétique (AG) pour le placement des actionneurs/capteurs. Parmi ces méthodes, nous avons mené notre étude en utilisant l’algorithme génétique.

En 1859, le naturaliste Charles Darwin publie son célèbre livre *On The Origin of Species* [87], qui a présenté une théorie pour expliquer le phénomène de l’évolution. Le paradigme darwinien de l’évolution génétique d’une population montre que les individus de cette population se trouvent en compétition, par exemple lors de la recherche de nourriture ou pour la reproduction. D’après la théorie de l’évolution de Darwin, les individus les plus adaptés survivent majoritairement et ont une descendance. Par suite, les caractéristiques génétiques de ces individus sont transmises à la génération suivante, qui voit potentiellement sa performance augmenter. Le patrimoine génétique de la population s’améliore ainsi de générations en générations.

Environ 100 ans plus tard, John Holland, ses collègues et étudiants de l’Université du Michigan se sont inspiré de cette théorie et ont tenté de mettre en place artificiellement des systèmes évolutifs basés sur la sélection naturelle [88]. Un procédé de codage est introduit, de manière à générer une structure génétique à partir des variables de décision du problème d’optimisation. On définit ensuite des opérateurs permettant l’évolution du patrimoine génétique de la population d’une génération à l’autre. Ces opérateurs font largement appel à des processus stochastiques. La performance (valeur de fitness) d’un individu, qui détermine sa capacité à survivre, est liée à la valeur de la fonction de coût. On peut définir la performance comme l’inverse ou l’opposé de la fonction de coût. La procédure d’optimisation consiste alors à simuler l’évolution d’une population, durant un certain nombre de générations, jusqu’à la détermination d’un individu optimal. La mise en œuvre de ces algorithmes a montré leur robustesse et leur capacité à déterminer le minimum global d’un problème. Les résultats de ces travaux ont abouti aux Algorithmes Génétiques, appartenant à la famille des algorithmes évolutionnaires, qui permettent d’obtenir des solutions approchées à certains problèmes d’optimisation complexes lorsqu’il n’existe pas de technique exacte (ou que la solution est inconnue) pour les résoudre en un temps raisonnable [89, 65, 67, 68, 69]. La nouveauté introduite par ce groupe de chercheurs était la prise en compte des opérateurs de croisement et mutation [90].

L’algorithme débute par le choix d’un codage permettant de représenter les variables du problème d’optimisation par une structure génétique. Une population initiale est ensuite créée en générant  $n$  individus aléatoirement. La performance de ces individus est

alors calculée, nécessitant  $n$  évaluations de la fonction de coût. A la fin de cette évaluation, trois opérations sont effectuées modifiant les caractéristiques génétiques de la population [67, 68, 89, 91]. Ce sont la sélection, le croisement et la mutation. L'opérateur de sélection qui agit en premier a pour rôle de choisir les individus de la population qui vont se reproduire. Le critère déterminant la sélection est lié à la performance des individus. Dans cette phase, un ensemble de solutions probables est acquis à partir de la population initiale. Ensuite, deux solutions (parents), choisis au hasard, sont utilisées pour créer deux autres solutions (descendants) par l'opération de croisement dans laquelle les parents échangent leurs informations génétiques. Certains chromosomes sont perturbés aléatoirement, de manière à explorer l'espace de recherche. C'est l'opération de mutation. Toutefois, cette opération ne produit pas toujours une meilleure solution. Cela peut même altérer les solutions mutées. Une fois la mutation terminée, les descendants sont évalués par la fonction de fitness, et leurs valeurs sont comparées à celles de tous les chromosomes de la génération précédente. Si la progéniture actuelle a des valeurs de fitness plus élevées, elle remplace les parents dans la nouvelle population. Les opérations de croisement et de mutation sont itérées jusqu'à ce que le critère final, qui peut être un nombre fixe de générations ou une solutions de la qualité souhaitée, soit atteint. Cet algorithme génétique classique est illustré par la figure 3.1 et les différentes étapes sont décrites dans les paragraphes suivants.

### 3.2.1 Génération de la population initiale

L'algorithme génétique commence par la génération d'un ensemble de solutions possibles appelé population initiale. Cette dernière, le plus souvent est générée aléatoirement [68]. Dans l'algorithme génétique, une possible solution au problème donné est représentée par un chromosome. Un gène est une position d'élément d'un chromosome et une allèle est la valeur qu'un gène prend pour un chromosome particulier.

### 3.2.2 Évaluation d'une solution

Le but d'un algorithme génétique est d'optimiser une fonction donnée dans un espace de recherche précis. Cette fonction est construite à partir du critère que l'on désire optimiser. L'application de cette fonction à un élément de la population permet de l'évaluer et de calculer sa performance vis à vis du problème à résoudre. Cette évaluation permet ensuite de faire des comparaisons entre les chromosomes pour déterminer la qualité de chacun d'eux. Le choix de la fonction de fitness est donc important, dépend du problème à résoudre et de l'espace de recherche qui en découle. L'espace de recherche, est généralement constitué de deux sous-espaces disjoints : l'espace des solutions admissibles et celui des solutions non admissibles. De nombreux problèmes de programmation linéaire ou non linéaire n'échappent pas à cette configuration [89, 92]. En cherchant un maximum faisable, l'algorithme génétique peut au cours du processus de recherche créer des solutions non

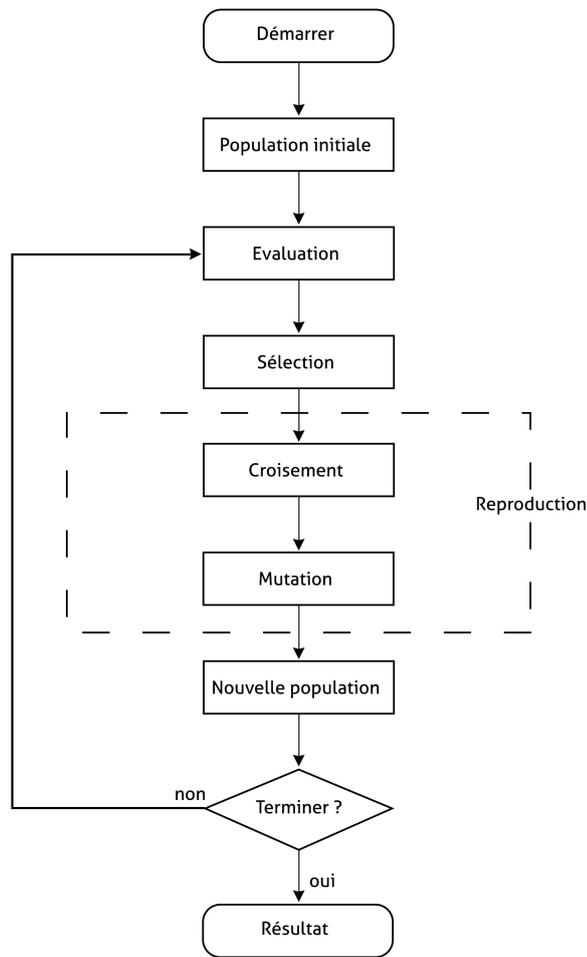


FIGURE 3.1 – Déroulement d’un algorithme génétique.

admissibles, solutions qui violeraient au moins l’une des contraintes. La solution dans ce cas, passe en général par l’utilisation d’une fonction de fitness à pénalité. L’efficacité d’une solution non admissible est automatiquement réduite.

### 3.2.3 Les opérateurs

Les opérateurs de reproduction jouent un rôle prépondérant dans la réussite d’un algorithme génétique. Nous en dénombrons trois principaux : l’opérateur de sélection, de croisement et de mutation. Si le principe de chacun de ces opérateurs est facilement compréhensible, il est toutefois difficile d’expliquer l’importance isolée de chacun de ces opérateurs dans le déroulement et la réussite de l’algorithme. Cela tient pour partie au fait que chacun de ces opérateurs agit selon divers critères qui lui sont propres (valeur sélective des individus, probabilité d’activation de l’opérateur, etc.).

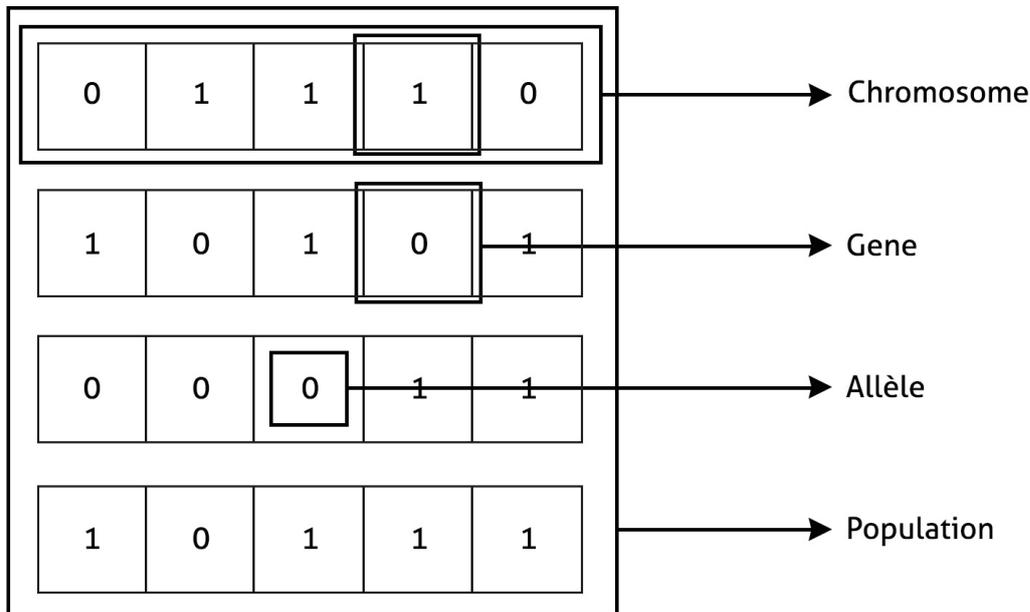


FIGURE 3.2 – Population, chromosome, gène.

## Sélection

La phase de sélection permet de choisir les individus qui participeront à la reproduction d’une population donnée. Elle agit donc comme un filtre qui cherche à conserver les individus possédant de “bonnes” caractéristiques génétiques. La seule mesure dont on dispose de la qualité d’un individu est sa performance, liée à la valeur de la fonction de fitness. Il semble donc naturel de sélectionner les individus pour lesquels la valeur de la fonction de fitness est la meilleure et d’éliminer les autres. Toutefois, cette approche doit être appréhendée avec précaution, puisqu’on souhaite conserver pour les générations suivantes les meilleures caractéristiques génétiques et pas seulement les meilleurs individus [89]. Un individu peut en effet avoir certains gènes présents dans la solution optimale mais une performance globale médiocre, et son élimination serait néfaste. Cependant, les individus ayant une bonne performance sont plus susceptibles de posséder les bons gènes. Cet aspect fait ressortir la notion de pression de sélection. Si la pression est trop forte, seul un petit nombre d’individus excellents survivent et la convergence de l’algorithme risque d’être prématurée, conduisant à un optimum local. Si la pression est trop faible, peu d’individus médiocres sont éliminés à chaque génération et la progression de la population est lente. En pratique, les opérateurs doivent tenir compte de cette notion de manière équilibrée. Différents processus de sélection sont disponibles dans la littérature, tels que la Roulette, la sélection par rang, la sélection par tournoi, l’échantillonnage universel stochastique et la sélection Boltzmann [68, 92, 91].

La sélection par la roulette fait correspondre toutes les chaînes possibles sur une roue avec une partie de la roue qui leur est attribuée en fonction de leur valeur de fitness. Cette roue est ensuite tournée au hasard pour sélectionner des solutions spécifiques qui participeront à la formation de la prochaine génération [92]. Cependant, cette sélection souffre de nombreux problèmes tels que les biais introduits par sa nature stochastique.

Pour palier à ces problèmes, De Jong et Brindle ont modifié la méthode de sélection de la roulette pour éliminer les erreurs en introduisant le concept de déterminisme dans la procédure de sélection [92, 91]. La sélection par rang est la forme modifiée de la sélection de la roulette. Elle utilise les rangs au lieu de la valeur de fitness. Les rangs sont attribués aux individus en fonction de leur valeur de fitness afin que chaque individu ait une chance d'être sélectionné en fonction de son rang. La méthode de sélection par rang réduit les risques de convergence prématurée de la solution vers un minimum local [92, 91].

La technique de sélection de tournoi a été proposée en 1983 pour la première fois par Anne Brindle [92, 93]. Cette technique peut sélectionner au hasard  $k$  types de solutions pour comparer leurs valeurs de fonction de fitness. Parmi ces solutions sélectionnées, seule la solution ayant la meilleure valeur de fonction de fitness est retenue. La même solution peut être sélectionnée à plusieurs reprises. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le nombre de solution conservées soit égal à la taille de la population [94].

L'échantillonnage universel stochastique (*Stochastic Universal Sampling - SUS*) est une extension de la méthode de sélection par roulette. Il utilise un point de départ aléatoire dans la liste des individus d'une génération et sélectionne le nouvel individu à intervalles réguliers [92]. Il donne une chance égale à tous les individus d'être sélectionnés pour participer au croisement pour la prochaine génération.

La sélection de Boltzmann est basée sur l'entropie et les méthodes d'échantillonnage, qui sont utilisées dans la simulation de Monte Carlo. Elle aide à résoudre le problème de la convergence prématurée [92, 91]. La probabilité est très élevée de sélectionner la meilleure chaîne, alors qu'elle s'exécute en très peu de temps. Cependant, il existe une possibilité de perte d'informations qui peut être gérée par l'élitisme.

## **Croisement**

Après l'opération de sélection, le croisement est appliqué sur deux chromosomes parents choisis aléatoirement dans la population courante pour produire de nouveaux chromosomes enfants. Les opérateurs de croisement sont utilisés en combinant les informations génétiques de deux parents ou plus. Généralement, aucun allèle nouveau n'est introduit dans la population. Cet opérateur effectue seulement une redistribution des gènes. En effet, les individus sélectionnés possédant certaines caractéristiques génétiques intéressantes, on tente de recombinaison celles-ci à travers l'opérateur de croisement. Lors de cette étape, les individus sont groupés par paire de parents de manière aléatoire. On réalise ensuite un échange partiel des chromosomes avec une probabilité  $p_c$  [67, 92, 89], généralement proche de l'unité. Une forte probabilité favorise l'échange d'informations, mais augmente

le risque de perdre de bonnes combinaisons. Les opérateurs de croisement bien connus sont le *1-point*, *2-points*, *k-points* [67, 92] et le croisement uniforme [95].

Dans un croisement *1-point*, un point de croisement aléatoire est sélectionné. L'information génétique de deux parents qui est au-delà de ce point sera échangée [67, 92] comme le montre la figure 3.3. Dans un croisement *2-points* et plus généralement *k-points*, 2 ou *k* points de croisement aléatoires sont sélectionnés et les informations génétiques des parents seront permutées selon les segments qui ont été créés. La figure 3.4 montre l'échange d'informations génétiques entre les points de croisement pour un 2-croisement. Que ce soit *1-point* ou *k-point*, l'échange d'allèle est une recopie alternée chez les enfants.

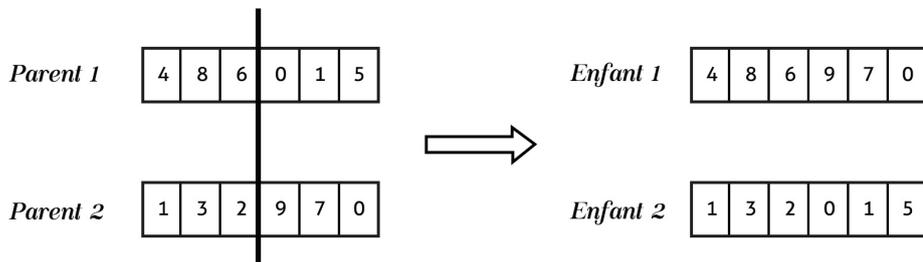


FIGURE 3.3 – Unique point de croisement.

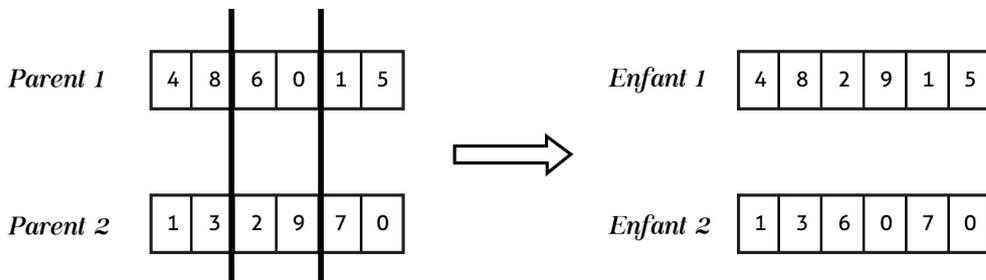


FIGURE 3.4 – Double points de croisement.

Le croisement aide à la diversification de la texture de la population, pour mieux explorer l'espace de recherche, tout en maniant la structure des individus. Les méthodes de croisement se différencie donc en fonction de la structure de données des individus à croiser. Il existe plusieurs autres types de croisement à savoir le croisement BLX- $\alpha$  [96], le croisement partiellement adapté (*Partially Matched Crossover* - PMX), le croisement d'ordre (*Order Crossover* - OX), le croisement préservant la priorité (*Precedence Preserving Crossover* - PPX), le croisement aléatoire (*Shuffle Crossover*), le croisement de substitution réduit (*Reduced Surrogate Crossover* - RCX) et le crossover de cycle (*Cycle Crossover*) [92].

## Mutation

La mutation est un opérateur qui maintient la diversité génétique d'une population à l'autre. L'opérateur de mutation permet aux algorithmes génétiques d'explorer largement l'espace de recherche. Cet opérateur est donc d'une grande importance et a de ce fait un double rôle : celui d'effectuer une recherche locale et/ou de sortir d'un piège d'un optimum local (recherche éloignée).

Chaque type de mutation convient à différents types de codage de solution. Les opérateurs de mutation les plus connus sont : la mutation de chaîne de bits, la mutation uniforme, la mutation non uniforme, la mutation limite et la mutation gaussienne [90, 97]. Il existe plusieurs autres types de mutation comme le déplacement, l'inversion simple, la mutation brouillée, etc... [92].

La mutation de chaîne de bits, se fait par des basculements de bits à des positions aléatoires. Celle de l'inversion simple prend le génome choisi et inverse les bits. La mutation limite quant à elle, remplace de façon aléatoire le génome par une limite inférieure ou supérieure. Cette mutation peut être utilisée pour les gènes entiers ou flottants. La mutation uniforme substitue la valeur du gène choisi par une valeur aléatoire uniforme sélectionnée entre les limites supérieures et inférieures spécifiées par l'utilisateur. Cet opérateur n'est utilisé que pour les gènes entiers et flottants. Dans le cas de la mutation non uniforme, la probabilité que la quantité de mutation passe à 0 avec la génération d'après est rehaussée à l'aide d'un opérateur de mutation non uniforme. Il bloque la stagnation de la population dans les premiers stades de l'évolution et accorde la solution dans les étapes ultérieures de l'évolution. Cet opérateur de mutation ne peut être utilisé que pour les gènes entiers et flottants. Enfin, la mutation gaussienne ajoute une valeur aléatoire distribuée gaussienne unitaire au gène choisi. Si elle se situe en dehors des limites inférieures ou supérieures spécifiées par l'utilisateur pour ce gène, la nouvelle valeur du gène est tronquée. Cet opérateur de mutation ne peut être utilisé que pour les gènes entiers et flottants.

### 3.3 Quelques travaux d'optimisation de couverture de zone

Pour une mesure précise des événements dans les RCSF, il est important d'obtenir la meilleure couverture de la zone à observer. Ce problème est connu sous le nom de problème de déploiement de capteurs pour une couverture maximale (*Maximum Coverage Sensor Deployment Problem* - MCSDP) et est connu pour être NP-Complet [61]. Plusieurs travaux ont été réalisés dans diverses situations pour résoudre le MCSDP. Nous présentons dans cette section un bref aperçu de quelques unes des solutions obtenues avec divers algorithmes.

Ozan Zorlu et Ozgur Koray Sahingoz [62] ont proposé un algorithme génétique pour améliorer la couverture d'un réseau de capteurs sans fil homogène. Le problème de la couverture maximale que les auteurs abordent dans cet article est basé sur le calcul de

la zone totale couverte par les capteurs. Les auteurs estiment la zone couverte par des formules géométriques. Ils décrivent d'abord le problème, puis ils le formulent pour leur algorithme génétique. Dans leur proposition, les auteurs cherchent à déployer un nombre minimum de nœuds capteurs dont les zones de détection ne doivent pas se recouvrir. Ils cherchent à maximiser la couverture de la zone tout en minimisant l'intersection entre les nœuds capteurs. Sur la base de cette formulation du problème, ils calculent la zone couverte par les capteurs déployés. Ils atteignent la couverture maximale en faisant varier les opérateurs de croisement et de mutation de l'algorithme génétique et montrent finalement que l'algorithme est performant et stable.

En se basant sur des travaux antérieurs qui appliquent les algorithmes génétiques aux problèmes de déploiement de capteurs, Yourim Yoon et Yong-Hyuk Kim [61] analysent le problème, sa représentation et ses propriétés et proposent une méthodologie qu'ils considèrent comme nouvelle et plus adaptée aux propriétés des algorithmes génétiques. Une méthode d'évaluation efficace et une nouvelle technique de normalisation sont également proposées. Les auteurs adoptent le modèle de couverture du disque booléen et traitent le problème de la couverture de zone. Ils se concentrent sur le problème de la maximisation de la zone couverte par le champ de capteurs avec un nombre donné de capteurs et utilisent le problème multidimensionnel du sac à dos à choix multiples pour la notation du problème. Contrairement à [62], ils basent leur étude sur  $n$  capteurs statiques de  $k$  types et chaque type de capteur peut couvrir une zone donnée avec un rayon fixe arbitraire  $r_1, r_2, \dots, r_k$ . Ils supposent qu'il y a au moins un capteur pour chaque type de capteurs. L'objectif est de trouver des emplacements  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  pour tous les  $n$  capteurs qui produisent la couverture maximale pour une zone donnée. Les auteurs ont donc proposé une nouvelle méthode de normalisation du problème qui pourrait améliorer les performances des algorithmes génétiques qu'ils utilisent. Cette méthode a été adaptée au MCSDP pour associer les algorithmes génétiques à la recherche de solution originale. Après avoir présenté quelques algorithmes génétiques (RANDOM<sup>1</sup>, PGA<sup>2</sup> et MGA<sup>3</sup>) qui sont sans normalisation, ils proposent l'OPTGA<sup>4</sup> qui, comme MGA, utilise la méthode de Monte Carlo avec un nombre croissant d'échantillons aléatoires pour évaluer les solutions, et réarrange les gènes du second parent pour minimiser la somme des distances avant d'appliquer la combinaison. Ils font ensuite une comparaison entre leur proposition et ces algorithmes et montrent que leur proposition est plus stable et plus rapide.

Avec une approche différente, Sami Mnasri et al.[64] ont travaillé sur la couverture de cible et ont présenté un modèle mathématique pour fournir un schéma de déploiement qui optimise la couverture de cible en tenant compte de la localisation de ces dernières, dans un réseau de capteurs audio. Ils visent à optimiser le placement des nœuds avec la distribution la plus uniforme possible des nœuds (ancres et nœuds mobiles) autour de

---

1. RANDOM est la méthode qui génère un certain nombre de solutions aléatoires et choisit la meilleure

2. PGA est un algorithme génétique avec le nombre fixe d'échantillons d'évaluation

3. MGA est un algorithme génétique utilisant l'évaluation de Monte Carlo

4. Algorithme génétique avec normalisation et nombre croissant d'échantillons d'évaluation

la cible à localiser. Pour modéliser le problème de la couverture de cible en considérant la localisation, ils définissent la fonction objectif en deux sous-fonctions (couverture et localisation), qu'ils additionnent ensuite. La sous-fonction objectif pour la couverture est la capacité d'un nœud mobile à calculer la couverture en fonction des cibles couvertes, tandis que celle de la localisation calcule la capacité pour chaque cible d'être surveillée par au moins  $n$  nœuds (mobiles ou ancrés). Ils publient treize contraintes qui constituent les règles de gestion du réseau et évaluent les performances de l'algorithme génétique proposé en termes de taux de couverture, de degré de couverture (k-couverture), de nombre d'itérations et de front de Pareto.

Nguyen Thihanh et al. [63] ont proposé une solution en réutilisant la même procédure que Yourim Yoon et Yong-Hyuk Kim dans [61]. Ils proposent un algorithme génétique appelé MIGA<sup>5</sup>, basé sur l'IGA<sup>6</sup> de Ly et al. [66]. Cet algorithme génétique est construit autour de l'expression d'un nouveau chromosome, d'une initialisation heuristique personnalisée, d'une fusion de la méthode de croisement de Laplace (Laplace Crossover - LX) et de la méthode de croisement arithmétique (Arithmetic Crossover Method - AMXO), et d'une recherche locale (VFA). Ils expliquent ce choix de combiner les deux méthodes de croisement par le fait qu'en IGA, l'opérateur de croisement utilisé fait que la descendance issue des parents suit strictement l'information génétique de ses parents sans possibilité de personnaliser les paramètres. La combinaison de LX et AMXO leur garantit de meilleurs résultats en termes de qualité des solutions issues du croisement. Ensuite, les auteurs effectuent le placement en utilisant des capteurs hétérogènes et en excluant complètement les chevauchements entre capteurs. De cette manière, ils ont non seulement trouvé un positionnement optimal pour tous les nœuds capteurs, mais ont également assuré le maximum de la couverture de la zone autant que possible. Pour augmenter la précision des résultats, ils utilisent un calcul de surface intégral exact pour la fonction de fitness afin de calculer la couverture de surface pour un ensemble de capteurs. L'efficacité de leur algorithme a ensuite été comparée à celle d'IGA, PSO<sup>7</sup>, DPSO<sup>8</sup>, ICS<sup>9</sup> et CFPA<sup>10</sup> et les résultats présentés montrent que MIGA offre de meilleures performances en termes de qualité de solution et de stabilité sur la majorité des instances testées.

### 3.4 Définition du problème

Le problème de couverture maximale abordé dans ce chapitre est basé sur le calcul de la surface totale couverte par les nœuds capteurs déployés. Notre contribution est basée sur la fonction d'évaluation de l'algorithme génétique et se concentre sur la recherche de

---

5. Modified Improved Genetic Algorithm

6. Improved Genetic Algorithm

7. Particle Swarm Optimization

8. Democratic PSO

9. Improved Cuckoo Search

10. Chaotic Flower Pollination Algorithm

meilleures positions des capteurs pour obtenir une bonne couverture.

### 3.4.1 Hypothèses

Considérons  $n$  comme le nombre de capteurs homogènes avec une portée identique  $r_s$ . Nous supposons que chaque capteur possède une antenne omnidirectionnelle, que la portée de détection et la portée de communication sont égales. La zone de détection pour chaque capteur est modélisée par un cercle dont le centre indique la position du capteur (avec ces coordonnées  $x$  et  $y$ ) et son rayon indique sa portée de détection. Le modèle de couverture du disque est booléen, qui est l'un des modèles de couverture le plus utilisé dans la littérature [63, 73, 61, 62]. La fonction de couverture utilisée est définie par :

$$f(s, p) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(s, p) \leq r_s \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.1)$$

où  $d(s, p)$ , la distance Euclidienne entre le capteur  $s$  et un point  $p$  est donnée par :

$$d(s, p) = \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2} \quad (3.2)$$

La zone  $A$  à couvrir par des capteurs est une région rectangulaire dans un espace euclidien à deux dimensions. Idéalement, pour couvrir entièrement  $A$ , il faudrait que l'équation (3.3) soit vérifiée :

$$Aire(A) = n\pi r_s^2 \quad (3.3)$$

.

### 3.4.2 Formulation du problème

Le problème que nous abordons dans ce chapitre peut être décrit comme suit : nous cherchons à avoir la couverture maximale avec un ensemble  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  de  $n$  capteurs de même rayon  $r_s$ . Nous prenons en compte le fait que plusieurs capteurs puissent se superposer au moment du déploiement, rendant complexe la détermination de la surface réellement couverte par les capteurs. Nous formulons que la surface réellement couverte par les capteurs, est la différence entre l'aire de la surface  $A$  que nous notons  $Aire(A)$  et la somme des aires des capteurs  $Aire(S_i)$ . Nous appelons cette différence  $Couverture(A)$  et la calculons comme présenté dans l'équation (3.4) :

$$Couverture(S, A) = Aire(A) - \sum_{i=1}^n Aire(S_i) \quad (3.4)$$

Cependant, en raison des chevauchements, le calcul de  $\sum_{i=1}^n Aire(S_i)$  n'est pas évident. Pour deux ou trois capteurs superposés comme l'illustre la figure 3.5, le calcul est faisable

et moins complexe.

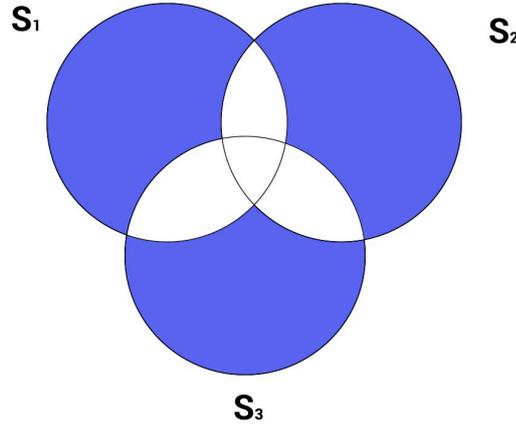


FIGURE 3.5 – Couverture de trois capteurs superposés

On note l'aire couverte par les trois capteurs de la figure 3.5,  $Aire(S_1 \cup S_2 \cup S_3)$ . Trouver cette aire, reviendrait à additionner les aires des capteurs puis à soustraire la somme des aires des intersections, en évitant de soustraire plusieurs fois la même aire d'intersection.

$$Aire(S_1 \cup S_2 \cup S_3) = Aire(S_1) + Aire(S_2) + Aire(S_3) - (Aire(S_1 \cap S_2) + Aire(S_1 \cap S_3) + Aire(S_2 \cap S_3)) + (2 \times Aire(S_1 \cap S_2 \cap S_3)).$$

Ceci se traduit par l'équation (3.5) :

$$Aire(U_{i=1}^N S_i) = \sum_{i=1}^n Aire(S_i) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n Aire(S_i \cap S_j) \quad (3.5)$$

Lorsque le nombre de capteurs est supérieur à trois comme le montre la figure 3.6, il est plus complexe d'évaluer de façon précise la surface exacte couverte par les capteurs, en utilisant des méthodes mathématiques.

Sur la base de ce qui précède, nous formalisons donc le problème comme suit :

$$Objectif = \begin{cases} \text{maximiser } Aire(U_{i=1}^n S_i) \\ \text{soumis à } (x_i, y_i) \in A, i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (3.6)$$

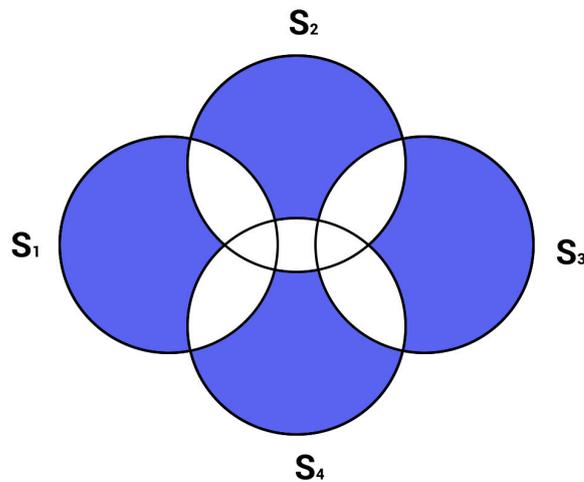


FIGURE 3.6 – Couverture de quatre capteurs superposés

### 3.4.3 Codage et fonction d'évaluation

#### Codage des solutions

Un chromosome représente une solution possible au problème à résoudre. Dans notre cas, nous représentons le chromosome comme une chaîne de coordonnées  $(x_i, y_i)$ , comme le montre la figure 3.7. Un individu est codé sous la forme d'un tableau de coordonnées de nœuds capteurs ; chaque paire d'élément représente l'emplacement du capteur correspondant dans la région de surveillance. La longueur de chaque chromosome est le double du nombre de capteurs déployés. Ainsi, si nous déployons 20 capteurs, chaque chromosome sera constitué d'une suite de 20 positions possibles (coordonnées), soit 40 variables de décision.

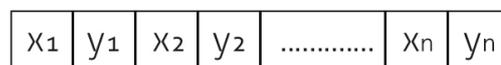


FIGURE 3.7 – Structure du chromosome

Comme indiqué ci-dessus, la population initiale est un ensemble de chromosomes générés aléatoirement dans lequel chaque chromosome est une collection de coordonnées. La génération de la population initiale est présentée dans l'algorithme 1.

---

**Algorithme 1** : Generation de la population initiale

---

**Require:**

Nombre de capteurs,  $n$   
Taille de la population initiale, pop size  
Grid\_Number,  $k$

**Ensure:** Population initiale, initPop

```
1: initPop = [ ];  
2: for  $i = 1$  to popsize do  
3:   initPop = Grid(randperm( $n$ ), :);  
4: end for
```

---

La fonction Grid nous permet de partitionner l'espace de déploiement en grille. La grille obtenue dépendra de la carte chargée. Le centre de tout capteur est positionné sur la grille. Ceci donne ainsi les coordonnées  $x$  et  $y$  de chaque capteur. Il y a donc autant de possibilités de choix de positions que d'intersections de lignes sur la grille. Ce numéro d'intersection est fourni dans la variable  $Grid\_number = k$ . Ainsi, à la ligne 3, le programme cherche à positionner aléatoirement les  $n$  capteurs sur les  $k$  intersections possibles, en parcourant la grille depuis la première position aléatoire choisie jusqu'à la fin de la grille.

**Définition de la fonction d'évaluation**

Nous avons montré dans la formulation du problème, que calculer la surface totale couverte par les nœuds en utilisant des formules mathématiques, lorsque le nombre de capteur est supérieur ou égal à quatre, est très complexe à appliquer. Ceci, du fait d'une ou de plusieurs superpositions qui surviennent lors du déploiement des nœuds capteurs.

Dans ce chapitre, nous proposons d'évaluer la zone couverte en considérant chaque nœud capteur comme une image et en proposant une autre et nouvelle façon de trouver la zone couverte. En effet, nous simulons une surface bidimensionnelle comme arrière-plan avec un nombre de 0. Le nombre de 0 dépend de la résolution initialement sélectionnée. Par exemple, une surface de  $10 \times 20$  avec une résolution de 0.5 fournira une table de  $20 \times 40$  de 0 dans la matrice. La taille du cercle est basée sur un rayon défini dans le chromosome. Chaque chromosome fournit les axes  $x$  et  $y$  de la position des cercles dans la zone rectangulaire définie ainsi que le rayon proposé  $r_s$  des cercles. Les coordonnées  $x$  et  $y$  changent à chaque génération pour qu'à la fin nous ayons les meilleures positions. Enfin, le programme compte le nombre de 1 à l'intérieur du champ rectangulaire. La couverture correspond au rapport entre le nombre de 1 et le nombre initial de 0. Le pseudo-code de l'algorithme 2 résume brièvement comment nous arrivons à évaluer les chromosomes.

---

**Algorithme 2** : Fonction d'évaluation

---

```
1: Simuler une zone  $A$  comme arrière-plan incluant un nombre de 0 ;
2: Chaque chromosome fournit les coordonnées  $x$  et  $y$  des capteurs à placer ;
3: Placer chaque capteur aux coordonnées indiquées dans le chromosome ;
4: La zone couverte par chaque capteur est entièrement remplie par des 1 ;
5:  $nb_u \leftarrow 0$  ( $nb_u$  : représente le nombre de 1 à l'intérieur de  $A$ )
6:  $nb_z \leftarrow 0$  ( $nb_z$  : représente le nombre de 0 à l'intérieur de  $A$ )
7: for all point  $p$  de  $A$  do
8:   if  $p$  est couvert par au moins un capteur then
9:      $nb_u \leftarrow nb_u + 1$ 
10:  else
11:     $nb_z \leftarrow nb_z + 1$ 
12:  end if
13: end for
14:  $couverture \leftarrow \frac{nb_u}{nb_u + nb_z} \times 100$  ;
```

---

Ensuite, la sélection des individus à soumettre au croisement et à la mutation est effectuée par rang. Les rangs sont attribués aux individus en fonction de leur valeur de fitness qui est calculée sur la base de l'algorithme présenté. Cette sélection permet que chaque individu ait une chance d'être sélectionné en fonction de son rang et de surcroît, réduit le risque de convergence prématurée de la solution vers un optimum local [92]. Après la phase de sélection, nous utilisons un croisement à point unique comme représenté à la figure 3.3. Un point de croisement aléatoire est sélectionné et les informations génétiques de deux parents au-delà de ce point sont échangées. Puis le processus recommence comme présenté avec la figure 3.1.

### 3.5 Résultats expérimentaux

Dans cette section, nous évaluons notre proposition. Nous utilisons 15 capteurs et considérons une population de taille 100. L'algorithme génétique se termine après 350 générations. Comme opérateurs de croisement et de mutation, BLX- $\alpha$  et la mutation gaussienne sont respectivement utilisés [80, 98, 96]. Le croisement BLX- $\alpha$  et la mutation gaussienne sont des méthodes de croisement et de mutation simple et efficace dans le cas de la représentation réelle de la population [96].  $P_c$  et  $P_m$  sont respectivement le taux de croisement et de mutation et la zone de détection  $A$  est un rectangle de dimension  $100 \times 90$ . Ces paramètres sont récapitulés dans le tableau 3.1.

Contrairement aux autres méthodes listées dans les travaux connexes, la nôtre se place en situation réelle de déploiement, et prend en compte le recouvrement des zones de détection entre plusieurs capteurs pour calculer et donner le taux de couverture maximal. Plusieurs tests ont été effectués. La figure 3.8 montre le déploiement initial au début de l'algorithme de l'un de ces tests. À chaque itération les positions des capteurs sont affi-

TABLE 3.1 – Paramètres de simulation.

Paramètres	Valeurs
Taille de la zone d'étude	$100 \times 90$
Nombre de capteurs	15
Rayon de couverture	30
Taille de la population	100
Nombre de générations	350
Type de croisement	BLX- $\alpha$
Type de mutation	Gaussienne
Taux de croisement	0,7
Taux de mutation	0,1

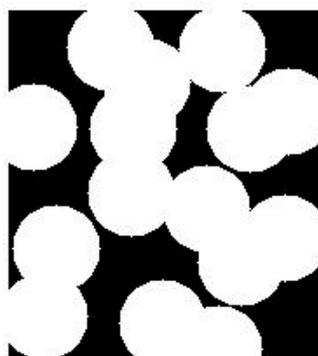
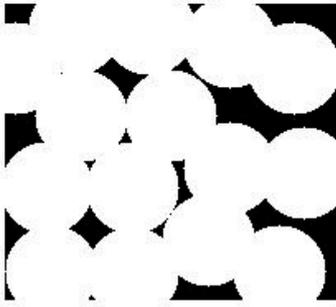


FIGURE 3.8 – Déploiement initial

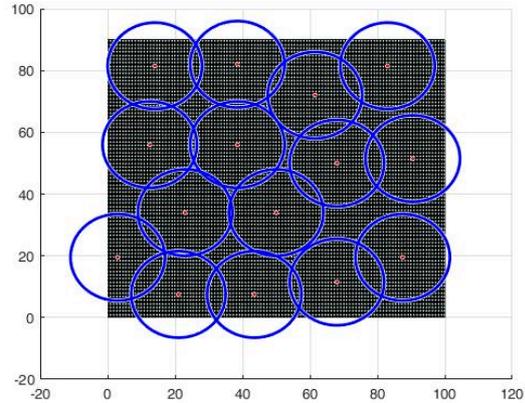
chées et à la fin, les meilleures positions des capteurs (figure 3.9(a) et figure 3.9(b)) sont données. Pour chaque ensemble de valeurs de couverture - croisement, couverture-nombre de capteurs, couverture-permutation et couverture -itération, nous avons mené plusieurs tests qui montrent que nous atteignons un taux de couverture allant jusqu'à 88%. Pour les cas illustrés dans les figures 3.9(a) et 3.9(b), nous atteignons 85% de taux de couverture. Les résultats ont montré que notre algorithme est efficace et que l'approche proposée fournit une meilleure couverture que le déploiement initial.

Les tableaux 3.2 et 3.3 montrent respectivement la variation du taux de couverture en fonction du pourcentage de croisement et la variation du taux de couverture en fonction du nombre de capteurs. Ainsi, pour le tableau 3.2 le nombre de capteurs reste inchangé et le taux de permutation est  $P_m = 0.1$ . Quant au tableau 3.3 le taux de permutation reste le même et le taux de croisement est  $P_c = 0.7$ .

En gardant le nombre de capteurs et les paramètres fixes, nous avons effectué plusieurs



(a) Meilleure population.



(b) Position finale des capteurs.

FIGURE 3.9 – Déploiement final

TABLE 3.2 – Variation du taux de couverture en fonction du pourcentage de crossover.

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>						
Pourcentage de croisement	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Pourcentage de couverture	75.5	77.1	73.35	76.61	79.3	75.9	80

tests dont certains des résultats numériques sont répertoriés dans le tableau 3.4. Ces tests montrent une couverture moyenne de 77,36% et un écart type de 2,14. Cet écart-type important montre qu'en moyenne le taux de couverture entre deux tests varie légèrement et oscille autour de 77%.

Afin de tester la robustesse de la solution proposée, nous la comparons aux travaux de [99], qui présentent un schéma de déploiement de capteurs basé sur l'optimisation des essaims de vers lumineux (GSO) pour améliorer la couverture après un déploiement aléatoire initial des capteurs. Chaque nœud capteur est considéré comme un vers lumineux individuel émettant une substance lumineuse dont l'intensité dépend de la distance entre le nœud capteur et ses capteurs voisins. Un nœud capteur est attiré vers ses voisins ayant une plus faible intensité et décide de se diriger vers l'un d'entre eux. De cette manière, la couverture du champ de détection est maximisée lorsque les nœuds de capteurs ont tendance à se déplacer vers la région ayant une densité de capteurs plus faible.

Le Tableau 3.5 présente les paramètres utilisés pour la comparaison entre les deux

TABLE 3.3 – Variation du taux de couverture en fonction du nombre de capteurs.

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>						
Nombre de capteurs	10	12	14	15	17	20	22
Taux de couverture	65	70.52	74.1	78.37	76.35	76.76	74.73

TABLE 3.4 – Variation du taux de couverture en fonction du nombre de tests.

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>						
Nombre de tests	2	4	6	8	10	12	14
Couverture moyenne	77.22	73.67	75.96.1	76.25	77.43	79.63	79.80

travaux. Ces paramètres sont les mêmes que énoncés dans les travaux de [99]. Toutefois, vu la différence de méthode utilisée, nous ajoutons aux paramètres du Tableau 3.5, la taille de population (30) et le nombre de génération (200).

TABLE 3.5 – Paramètres de comparaison.

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
Déploiement sous forme régulière	Oui
Déploiement avec chevauchement	Oui
Taille de la zone de déploiement	100 × 100
Nombre de capteurs	200
Portée de détection	10

Les résultats présentés dans [99] montrent que lorsque le nombre de capteurs est 200, leur taux de couverture est élevé, et ils l'estiment approximativement à 96%. Dans les mêmes conditions, nous atteignons largement un taux de couverture de 100%. La figure 3.10 illustre la répartition finale des capteurs en utilisant notre méthode de déploiement avec les paramètres de [99].

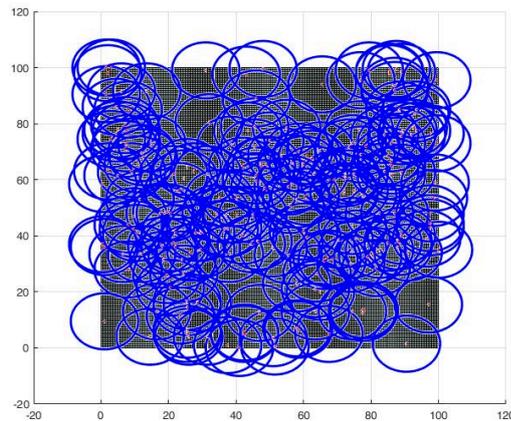


FIGURE 3.10 – Position finale des capteurs

## 3.6 Conclusion

En raison du nombre croissant de nœuds capteurs et des recouvrements probables des zones de détection de ces nœuds lors du déploiement, le problème de couverture de zone ne peut être résolu à l'aide de formules mathématiques discrètes. Ce chapitre a présenté une solution à ce problème. Nous avons formellement défini le problème du déploiement de capteurs à couverture maximale (MCSDP), qui se produit fréquemment dans les applications du monde réel. Compte tenu de cette définition, nous avons proposé une nouvelle méthode d'évaluation des aires des nœuds capteurs en combinant cette méthode avec un algorithme génétique. Notre approche, testée avec des nœuds capteurs homogènes montre l'efficacité et l'efficacité du système proposé. Nous avons ensuite comparés nos résultats à des travaux existants. Il ressort de cette comparaison que nos résultats sont meilleurs. Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur le déploiement de capteurs homogènes en vue de garantir une couverture maximale dans une zone d'intérêt à forme régulière. Une fois ce problème approché, nous envisageons dans le chapitre suivant, un déploiement sur des zones de formes géométriques diverses. Nous ajoutons à ce déploiement la contrainte de connectivité entre les capteurs, et des zones que nous appellerons des "zones de non intérêt", qui ne nécessitent pas de couverture dans l'espace de déploiement.

## CHAPITRE 4

# MAXIMISATION DE LA COUVERTURE DE ZONE SOUS CONTRAINTE DE CONNECTIVITÉ DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>65</b>
<b>4.2</b>	<b>Quelques travaux relatifs à la couverture et à la connectivité</b>	<b>66</b>
<b>4.3</b>	<b>Modèle de système</b>	<b>69</b>
4.3.1	Modèle de réseau et hypothèses	69
4.3.2	Modèle de couverture et de connectivité	70
4.3.3	Formulation de la programmation linéaire	71
<b>4.4</b>	<b>Évaluation de la couverture</b>	<b>72</b>
<b>4.5</b>	<b>Évaluation de la connectivité</b>	<b>74</b>
<b>4.6</b>	<b>Résultats expérimentaux et discussions</b>	<b>77</b>
4.6.1	Résultats expérimentaux	77
4.6.2	Discussion	78
<b>4.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>81</b>

---

## 4.1 Introduction

De part leur rôle de collecte et de transmission des données d'une région d'intérêt à un noeud puits pour traitement et analyse, les RCSF ont plusieurs applications importantes, qui interviennent dans divers secteurs comme nous l'avons expliqué dans les chapitres précédents. Il est donc essentiel d'assurer non seulement une couverture maximale de la zone de déploiement mais aussi une communication entre les nœuds formant le réseau. Dans le chapitre précédent, nos travaux se sont concentrés sur le déploiement de capteurs,

dans le but d'optimiser la couverture d'une zone régulière. Les résultats de ces travaux ont montré qu'avec notre façon d'évaluer les chromosomes, nous pouvons considérablement optimiser la couverture. Toutefois, la question de la connectivité entre les capteurs déployés n'a pas été abordée. La couverture et la connectivité sont deux problèmes parmi les plus fondamentaux des RCSF [60]. En raison des caractéristiques contraignantes de ces réseaux, l'un des premiers défis auxquels ils sont confrontés est de déterminer comment couvrir parfaitement une zone de surveillance pour capter les informations et les transmettre. L'une des solutions envisagées pendant longtemps a été d'augmenter le nombre de capteurs. Cependant, cette solution n'est pas forcément efficace. Une fois qu'une bonne couverture est garantie, les données capturées doivent être acheminées via un routage multi-sauts vers un nœud, considéré comme un « point de collecte », appelé nœud-sink (ou puits). Ce dernier peut être connecté à l'utilisateur du réseau (via Internet, un satellite ou un autre système). Outre la couverture, la connectivité est un élément tout aussi vital des réseaux de capteurs sans fil. Le réseau dans une zone définie est connecté si chaque nœud capteur déployé a au moins un nœud voisin avec lequel il est connecté. Si un nœud capteur communique directement avec la station de base, on parle de communication à saut unique. Dans le cas contraire, on parle d'une communication multi-sauts.

Dans ce chapitre, le problème de couverture maximale que nous abordons se concentre donc à la fois sur le calcul de la zone couverte par les nœuds capteurs déployés mais aussi sur la connectivité entre eux. Aussi, cherchons-nous à déployer les nœuds capteurs sur une zone d'intérêt, quelque soit sa forme géométrique, en utilisant un algorithme génétique pour trouver un meilleur positionnement qui assure, non seulement une couverture réseau maximale, mais aussi une connectivité totale. Nous définissons les problèmes de couverture maximale et de connectivité, puis proposons un modèle mathématique et une fonction objective. Les résultats montrent que l'algorithme, que nous appelons GAFACM (Genetic Algorithm For Area Coverage Maximization), couvre toutes les formes de zone pour un nombre donné de capteurs et trouve les meilleures positions pour maximiser la couverture au sein de la zone d'intérêt tout en garantissant une connectivité totale entre les capteurs.

## 4.2 Quelques travaux relatifs à la couverture et à la connectivité

Bien que plusieurs études aient été menées pour résoudre le problème de couverture et celui de connectivité, il existe un besoin continu d'affiner les solutions proposées ou d'en proposer de nouvelles. Pour ce faire, des techniques d'optimisation peuvent être utilisées pour identifier les meilleurs emplacements de nœuds qui satisfont les objectifs souhaités. Dans cette section, nous présentons quelques-unes des solutions récentes proposées et basées sur les algorithmes génétiques.

La section 3.2 du chapitre précédent a présenté quelques travaux effectués dans le cadre du placement optimal des capteurs. Ce problème a d'abord été abordé par Yourim Yoon

et Yong-Hyuk Kim, qui ont montré qu'il est NP-Complet [61]. Ils se sont concentrés sur le problème de la maximisation de la couverture d'une zone d'intérêt en proposant un algorithme génétique appelé OPTGA<sup>11</sup>. Cet algorithme utilise la technique de Monte Carlo avec un nombre accru d'échantillons aléatoires pour estimer les solutions et réordonner les gènes du deuxième parent, pour minimiser la somme des distances avant l'application de la recombinaison. Pour améliorer d'avantage les performances d'OPTGA, ils l'ont fusionné avec une méthode de recherche locale qu'est l'algorithme de force virtuelle (*Virtual Force Algorithm* - VFA). Cette fusion a cependant augmenté la complexité de calcul de cet algorithme. Pour surmonter ce problème de complexité observé dans les travaux de Yourim Yoon et al. [61], Ly et al. [66] ont proposé un algorithme appelé IGA<sup>12</sup>, qui utilise la représentation individuelle et remplace la technique de Monte Carlo de [61], par une nouvelle technique. Cette technique introduit une nouvelle heuristique d'opérateur de mutation dynamique. Cela a conduit à une réduction considérable de la complexité de calcul et à une augmentation de la qualité de la solution IGA par rapport à OPTGA proposé dans [61]. Ils ont introduit un nouveau concept - le chevauchement - pour concevoir une nouvelle fonction d'évaluation, une technique heuristique pour initialiser la population et une mutation dynamique au lieu de la statique.

Cependant, les travaux cités ci-dessus se concentrent uniquement sur la couverture et ne répondent pas au problème de connectivité. Pour y répondre, SK. Gupta et al. [68] ont proposé une approche basée sur un algorithme génétique pour trouver des positions potentielles pour le placement des nœuds capteurs de sorte que tous les points cibles soient *k - couverts* et que tous les nœuds capteurs soient *m - connectés*. Ils ont présenté leur formulation en programmation linéaire du problème puis présenté leur approche basée sur l'algorithme génétique qu'ils proposent, avec une représentation appropriée des chromosomes, la dérivation de la fonction de fitness, les opérateurs de sélection, de croisement et de mutation.

Benatia Mohamed et al [59] ont présenté et évalué deux algorithmes évolutifs pour un problème de déploiement d'un RCSF en intérieur. Ils ont proposé une stratégie de déploiement multi-objectifs (MODS) basée sur des algorithmes évolutifs et qui permet le déploiement d'un RCSF pour une application de construction intelligente. Dans l'approche de déploiement, ils ont pris en compte les contraintes du bâtiment (murs, portes, etc.) qui peuvent affecter la communication du réseau en utilisant un modèle de propagation approprié. La méthode de déploiement proposée est ensuite formulée comme un problème d'optimisation combinatoire, en considérant simultanément une variété d'objectifs (couverture, coût connectivité).

Subash Harizan et Pratyay Kuila [67] ont proposé une approche basée sur un algorithme génétique pour une programmation écoénergétique des nœuds capteurs. Une collection de nœuds capteurs,  $S = S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ , est répartie de manière aléatoire dans

---

11. Algorithme génétique avec normalisation et nombre croissant d'échantillons d'évaluation

12. Improved Genetic Algorithm

une région d'intérêt pour surveiller en continu ou périodiquement un ensemble de cibles  $K$ ,  $\psi = \psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_k$ . L'algorithme proposé sélectionne un ensemble de nombre minimum de nœuds capteurs actifs à partir de  $S$  pour fournir une couverture complète des points cibles et également maintenir la connectivité entre les nœuds capteurs activés et la station de base.

Zain Eldin Hanaa et al. [65] ont proposé une technique de déploiement pour maximiser la couverture des nœuds répartis de manière aléatoire dans une zone d'intérêt. Ils ont introduit une technique de déploiement dynamique, basée sur un algorithme génétique, appelé IDDT-GA<sup>13</sup>, pour maximiser la couverture de la zone en réduisant le nombre de nœuds capteurs dans le déploiement aléatoire. En réduisant le nombre de nœuds capteurs, les auteurs diminuent les zones de recouvrement entre nœuds et augmentent par conséquent la zone couverte par les capteurs. L'approche introduite dans leurs travaux utilise la notation de codage à longueur variable par un croisement à deux points et leur permet de garantir une 1 – *connectivité* entre les nœuds capteurs.

Njoya et al. [69] ont abordé la couverture cible comme [68] en proposant une approche hybride qui assure le déploiement sur une grille pour couvrir les cibles tout en tenant compte de la connectivité. Les auteurs ont proposé une approche hybride séquentielle basée sur trois algorithmes. En fonction de l'emplacement des cibles, de l'emplacement du puits et du nombre de cibles, le premier algorithme place les premiers capteurs pour couvrir toutes les cibles. Le second algorithme supprime les redondances de l'algorithme de placement pour réduire le nombre de capteurs déployés. Et finalement le troisième, basé sur le problème du voyageur de commerce avec l'algorithme génétique, génère un arbre qui donne un chemin minimal qui relie les capteurs déployés et le puits pour établir la connectivité.

Plus tard, Khalilpour Akram et al. s'attaquent aux problèmes de tolérance aux pannes et de connectivité dans les RCSF dans [100]. Ils ont concentré leur travail sur la restauration de la connectivité et ont proposé une solution pour accomplir une restauration de  $k$  – *connectivité* basée sur le mouvement. Cette technique divise les nœuds en deux catégories. Les nœuds critiques, qui sont les nœuds dont la défaillance réduit la connectivité, et les nœuds non critiques dont la défaillance n'impacte pas la connectivité du réseau. L'algorithme (PINC<sup>14</sup>) déplace un nœud non critique avec un coût de déplacement minimum vers la position du nœud critique défaillant. L'utilisation d'ondes ultrasonores, ou l'utilisation d'un indicateur de force unique reçu, leur permet d'identifier les obstacles, de sorte que les nœuds peuvent détecter et ignorer les liens qui traversent les obstacles.

Plus récemment, Akusta et al. dans [101] et Mohsen et al. dans [102] passent en revue les problèmes de couverture et de connectivité dans les RCSF. Akusta et Zuleyha [101] ont discuté des approches d'estimation de la connectivité pour les réseaux de capteurs sans fil compatibles avec l'Internet des objets. Ils présentent les approches d'estimation

---

13. Improved Dynamic Deployment Technique based-on Genetic Algorithm

14. Pickup Non-Critical Node

de la connectivité, décrivent pour chaque approche les idées principales et expliquent leur fonctionnement en illustrant des exemples de réseaux. Comme, dans les RCSF, la connectivité est généralement obtenue dans deux cas ( $k = 1$  et  $k > 1$ ), les auteurs ont divisé le problème d'estimation de la connectivité en deux catégories et présentent une série d'algorithmes pour chaque cas. Mohsen Sheikh-Hosseini et al. [102], quant à eux, étudient le déploiement de nœuds pour relever les défis de la couverture cible et de zone et les défis de la connectivité dans les RCSF homogènes et hétérogènes, distribués de manière aléatoire. Les auteurs suggèrent une nouvelle méthode en modes centralisé et distribué qui couvre toutes les cibles par le nombre requis de capteurs, fournit une couverture de zone et une connectivité maximales sur le réseau, et gère le mouvement des nœuds capteurs des emplacements initiaux aux emplacements finaux. Dans le cas de la couverture cible, une nouvelle méthode de déploiement analytique utilisant l'algorithme de descente la plus raide (*Steepest Descend Algorithm - SD*) avec les règles d'Armijo et de Wolf est proposée à la place des méthodes évolutives.

A notre connaissance, à l'exception des travaux de Ly Dinh Thi Ha et al. [65], qui prennent en compte les recouvrements entre les nœuds capteurs, les études citées ci-dessus et rencontrées dans la littérature effectuent le déploiement en se basant sur des cas sans recouvrements, utilisent des zones de forme régulières  $M \times N$  et ne traitent pas tous simultanément de la couverture et de la connectivité. Dans ce chapitre, nous introduisons une étude de déploiement pour la couverture maximale en tenant compte des recouvrements des nœuds capteurs tout en assurant la connectivité totale du réseau. En conséquence, nous nous sommes concentrés sur la couverture de zone avec un ensemble de nœuds capteurs, quelle que soit la forme géométrique de la région d'intérêt. Notre travail est basé sur un algorithme génétique et se concentre sur :

- le choix les positions optimales des capteurs ;
- l'estimation de la zone réelle couverte par les capteurs en tenant compte du chevauchement ;
- le déploiement sur tous les types de surface (forme régulière ou non) ;
- la maximisation de la couverture dans la zone d'intérêt ;
- la minimisation de la couverture en dehors de la zone d'intérêt ;
- la connectivité totale entre les capteurs ;

## 4.3 Modèle de système

### 4.3.1 Modèle de réseau et hypothèses

Nous examinons le double problème de la maximisation de la couverture de zone tout en assurant la connectivité dans le RCSF tel que formulé ci-dessus. Nous considérons un scénario d'application RCSF où un ensemble de  $N$  nœuds capteurs,  $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_N\}$ , sont premièrement déployés au hasard dans une région d'intérêt. Nous avons à faire avec

de nombreux types de régions, de sorte que la zone à couvrir avec des capteurs peut être de forme régulière ou non. Nous supposons que tous les capteurs sont homogènes et que les capacités de calcul et de puissance de tous les nœuds sont identiques. Chaque capteur a une portée de détection  $r_s$  et une portée de communication  $r_c$  qui sont égales et arbitraires. La zone de détection de chaque capteur est modélisée par un cercle ; le centre du cercle indique la position du capteur et son rayon indique sa portée de détection et de communication. Comme dans le chapitre précédent, nous utiliserons le modèle de couverture booléen dont nous rappelons l'équation (3.1) :

$$f(s, p) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(s, p) \leq r_s \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad ((3.1))$$

ou  $r_s$  est la plage de détection et  $d(s, p)$  la distance euclidienne du capteur  $s$  vers un point  $p$  est rappelée par l'équation (3.2) :

$$d(s, p) = \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2} \quad ((3.2))$$

### 4.3.2 Modèle de couverture et de connectivité

La figure 4.1 illustre une zone d'intérêt. Cette zone est représentée dans une grille contenant des pixels. Le pixel est l'unité de base de la couleur programmable sur un écran d'ordinateur ou dans une image. La zone « valeur 1 » représente la zone où les pixels sont à 1 tandis que la zone « valeur 0 » représente la zone où les pixels sont à 0. Il y a  $n \times n$  pixels dans la grille. Supposons que la carte se compose du nombre  $m$  de pixels. Les pixels à l'intérieur de la carte sont définis sur 0 tandis que partout ailleurs est défini sur 1, comme le montre la figure 4.1.

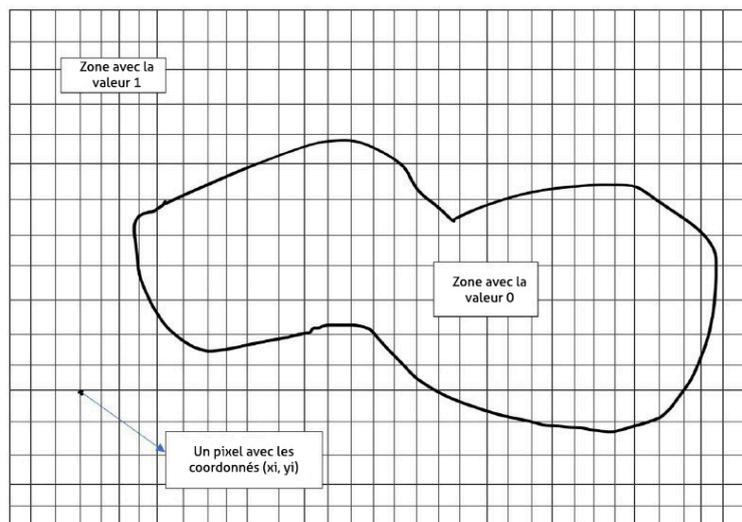


FIGURE 4.1 – Zone à couvrir dans une grille.

Le  $i^{eme}$  capteur a des coordonnées  $(x_i, y_i)$  telles que la plupart des pixels de la carte sont situés à l'intérieur du cercle de centre  $(x_i, y_i)$  et de rayon  $r_s$ . Cela signifie que les pixels de la carte seraient couverts par au moins un capteur. De plus, nous nous attendons à ce que les pixels en dehors de la région d'intérêt soient non couverts, ou aussi peu couverts que possible. Enfin, une connectivité complète doit être garantie. Cela signifie que quelle que soit la paire de capteurs choisie, il existe au moins un chemin qui les relie. Les nœuds capteurs communiquent dans la plage de communication ( $r_c$ ) pour échanger des données jusqu'à atteindre le puits. Le réseau est dit connecté s'il existe au moins un chemin ( $k = 1$ ) entre chaque nœud capteur et le puits. De plus, s'il existe plusieurs chemins différents entre chaque capteur et le puits, on parle de  $k - connectivité$  où  $k > 1$  [74]. Deux capteurs  $s_1$  et  $s_2$  sont dits non connectés si la distance euclidienne entre  $s_1$  et  $s_2$  est supérieure à  $r_c$  (figure 4.2) et connectés si cette distance est inférieure ou égale à  $r_c$  (figure 4.3).

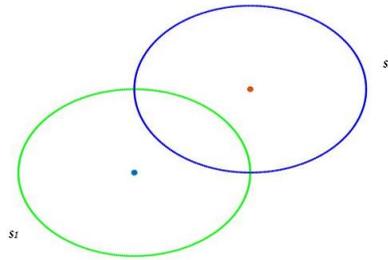


FIGURE 4.2 – Deux capteurs non connectés

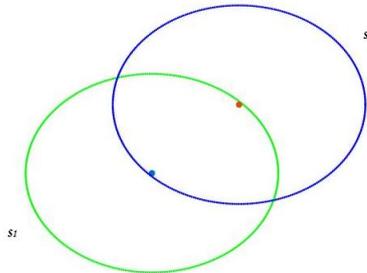


FIGURE 4.3 – Deux capteurs connectés.

### 4.3.3 Formulation de la programmation linéaire

Nous formulons le problème ci-dessus comme le problème d'optimisation mathématique suivant :

1. La carte à couvrir est représentée sur la figure 4.1 par la zone « valeur 0 », et nous l'appelons  $A$ .
2.  $M$  désigne l'ensemble des pixels qui sont dans la carte.

$$M = \{ j / j \in A \iff j = 0 \} \quad (4.1)$$

3.  $M'$  désigne l'ensemble des pixels qui sont en dehors de la carte.

$$M' = \{ j/j \notin A \iff j = 1 \} \quad (4.2)$$

Le problème de couverture et de connectivité peut être énoncé comme suit : étant donné  $A$ , nous devons placer les nœuds capteurs pour couvrir la majeure partie de  $A$  tout en veillant à ce que le réseau soit entièrement connecté.

Soient  $Z_{ij}$ ,  $Z'_{ij}$  et  $C_{ij}$  les variables booléennes définies comme suit :

$Z_{ij}$  désigne l'ensemble des pixels de la carte qui sont couverts par un capteur  $s_i$

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } j^{\text{eme}} \text{ pixel de carte est couvert par } i^{\text{eme}} \text{ capteur, } \forall j \in M \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.3)$$

$Z'_{ij}$  désigne l'ensemble des pixels extérieurs à la carte qui sont couverts par un capteur  $s_i$

$$Z'_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } j^{\text{eme}} \text{ pixel hors de la carte est couvert par } i^{\text{eme}} \text{ capteur, } \forall j \in M' \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.4)$$

$C_{ij}$  désigne la connectivité entre le capteur  $s_i$  et  $s_j$

$$C_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } d(s_i, s_j) \leq 2r_s \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.5)$$

ou  $d(s_i, s_j)$  est la distance Euclidienne et donnée par l'équation (3.2).

Ensuite, le problème de programmation linéaire formulé est donné par l'équation(4.6) :

$$\text{Objectif} = \begin{cases} \text{Maximiser } Z_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in M} Z_{ij} \\ \text{Minimiser } Z_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in M'} Z'_{ij} \end{cases} \quad (4.6)$$

## 4.4 Évaluation de la couverture

La valeur d'un chromosome représente son niveau de qualité en fonction des objectifs. Dans le travail proposé, l'objectif est de placer les capteurs dans la zone d'intérêt pour :

- garantir la couverture maximale à l'intérieur de la zone d'intérêt ;
- garantir la couverture minimale à l'extérieur de la zone ;
- maintenir une connectivité complète entre les capteurs.

La fonction de fitness à maximiser, a été définie comme le pourcentage exact de surface couverte dans la zone d'intérêt. Nous construisons la fonction de fitness en fonction des paramètres suivants décrits ci-dessous :

1. Le premier objectif est de garantir la couverture maximale à l'intérieur de la zone d'intérêt :

$$\text{Maximiser } Z_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in M} Z_{ij} \iff \text{Minimiser } Z'_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in M} (1 - Z_{ij}) \quad (4.7)$$

2. Le deuxième objectif est d'avoir le moins de couverture à l'extérieur.

$$\text{Minimiser } Z_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in M'} Z'_{ij} \quad (4.8)$$

3. Sous la contrainte de connectivité comme indiqué dans les équations (4.5) et (4.6).

Pour implémenter les équations 4.7 et 4.8, nous estimons aussi la zone couverte en traitant chaque nœud capteur comme une image. L'algorithme 2 utilisé dans le chapitre précédent a été modifié et complété. Sur le même principe de cet algorithme, nous délimitons d'abord la zone d'intérêt où déployer des capteurs, puis nous plaçons les capteurs avec la contrainte de connectivité et enfin calculons la couverture exacte. Dans un premier temps nous chargeons la zone sur laquelle nous voulons déployer. À l'inverse du précédent algorithme, où la zone est considérée d'office carrée, nous travaillons dans ce chapitre avec des zones multiformes. L'algorithme ne génère donc plus automatiquement la grille de maillage qui sert à déployer les capteurs. Cette grille est générée par contre après que nous ayons chargé la région d'intérêt et nous y avons l'ensemble des positions potentielles des nœuds. Toutes les zones en dehors de la zone de déploiement qui nous intéressent sont remplies de 0. L'algorithme 1 est alors utilisé pour générer la population initiale. Chaque fois qu'un capteur est placé, le cercle formé par ce capteur est automatiquement rempli de 1. Si des capteurs se recouvrent, la zone de recouvrement se remplit de 1 et est compté une seule fois. Cela garantit qu'un excédent de couverture ne sera pas pris en compte et donc que la couverture précise est trouvée. Si des capteurs ou des parties de capteurs sont déployés en dehors de la zone d'intérêt, les 1 qui se trouvent à l'extérieur ne sont pas comptés. Ceci permet de savoir de façon exacte quelle est le pourcentage de couverture à l'intérieur de la zone d'intérêt. Finalement, le programme compte le nombre de 1 à l'intérieur de la zone d'intérêt. Le taux de couverture est le rapport du nombre de 1 au nombre initial de 0. Le pseudo code de l'algorithme 3 illustre l'explication donnée.

---

**Algorithme 3** : Évaluation de la couverture

---

```
1: Chargement de l'image ;
2: Conversion en niveau de gris ;
3: Parcours de la zone d'intérêt ;
4: Maillage de la carte ;
5: Remplissage des différentes zones ;
6: Compter le nombre de 0 ;
7:  $s \leftarrow$  nombre de 0 ;
8: Le tampon circulaire fait par un capteur est entièrement rempli par un cercle formé
   de 1 ;
9: Les coordonnées x et y de la position des cercles à l'intérieur de la zone d'intérêt
   sont données par chaque chromosome ;
10: Placer le centre d'un tampon sur la position des cercles définis dans le chromosome ;
11: Compter le nombre de 1 dans la zone d'intérêt ;
12: if Recouvrement entre les aires de couverture des capteurs then
13:   Compter une seule fois les 1 dans la zone de recouvrement ;
14: else
15:   Compter le nombre de 1 ;
16: end if
17: if l'aire de couverture des capteurs va au delà de la zone d'intérêt then
18:   Compter uniquement les 1 qui sont à l'intérieur de la zone d'intérêt ;
19: else
20:   Compter le nombre de 1 ;
21:  $b \leftarrow$  nombre de 1 ;
22: end if
23: % de couverture =  $\frac{b}{s} \times 100$  ;
```

---

## 4.5 Évaluation de la connectivité

Deux nœuds capteurs sont connectés si et seulement si, ils peuvent communiquer directement (connectivité à un saut) ou indirectement (connectivité multi-sauts) [60]. Dans [59], la connectivité est définie comme la capacité de communication entre les différents nœuds du réseau où les données sont transmises à la station de base par un seul saut ou par plusieurs sauts. Pour établir et respecter la contrainte de connectivité, telle qu'elle est présente dans l'équation (4.7), nous procédons comme suit : par rapport à chaque solution, il existe des paires de  $[x_i, y_i]$  pour  $i = 1, \dots, N$  et un rayon unique  $r$ .  $[x_i, y_i]$  est l'emplacement du  $i^{eme}$  capteur déployé. On considère les points  $x_i$  comme l'ensemble des sommets d'un graphe nommé  $G$ . Ensuite, nous générons une matrice carrée de taille  $N \times N$  appelée  $C$ . La matrice  $C$  est considérée comme la matrice d'adjacence du graphe  $G$ .  $c_{ij}$  vaut 1 si la distance entre la position  $[x_i, y_i]$  et la position  $[x_j, y_j]$  est inférieure ou égale

à la valeur  $r$ , et 0 sinon comme illustré avec l'équation (4.5). On cherche maintenant les composantes connexes du graphe  $G$ . Un composant connecté est un groupe de capteurs connectés les uns aux autres. Chaque composant connecté est placé dans une variable sous forme de lot, et chaque lot se voit attribuer un numéro. Ce nombre indique à quelle composante appartient chaque nœud du graphe. Si les lots n'ont qu'un seul numéro pour tous les nœuds, cela signifie que  $G$  n'a qu'un seul composant connecté et que tous les capteurs sont connectés les uns aux autres, de sorte que  $G$  est entièrement connecté.

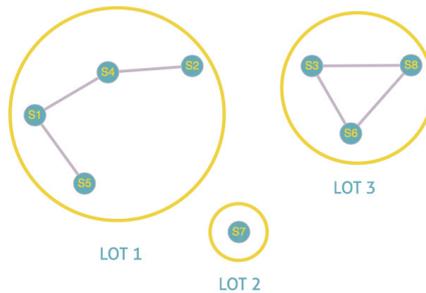


FIGURE 4.4 – Réseau non connecté.

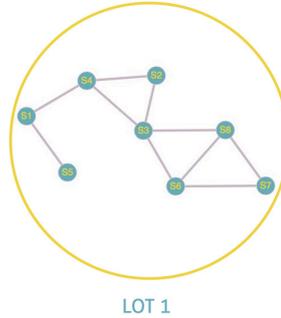


FIGURE 4.5 – Réseau connecté.

Les figures 4.4 et 4.5 illustrent l'explication donnée ci-dessus. Dans ces illustrations, on considérera que deux capteurs sont connectés s'il existe un lien entre eux et non connectés sinon. Dans la figure 4.4, nous remarquons que les capteurs  $S_5$ ,  $S_1$ ,  $S_4$  et  $S_2$  sont connectés entre eux. Il en va de même pour  $S_6$ ,  $S_3$  et  $S_8$ . Le capteur  $S_7$  étant seul, il est par défaut connecté à lui-même. Le programme crée donc trois lots avec un numéro pour chaque lot. Tous les nœuds appartenant au premier lot auront le numéro 1 et ainsi de suite. L'existence de plus d'un lot, et donc de plusieurs numéros, signifie que le graphe n'est pas totalement connexe. En effet nous avons trois composantes connexes pour la figure 4.4. En revanche, dans le cas d'une connectivité totale, comme illustré sur la figure 4.5, le programme placera tous les capteurs dans le même lot. Comme il n'y a qu'un seul

numéro de lot et donc qu'un seul composant connexe, on peut en déduire que le graphe est entièrement connexe.

---

**Algorithme 4** : Evaluation de la connectivité

---

**Require:**Rayon,  $r_s$ Chromosome,  $\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$  $\text{dist} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ 

Nombre de lot, nb ;

compteur, i, j ;

- 1: Sélectionner un chromosome ;
  - 2: Former le graphe  $G$  ;
  - 3: Générer la matrice  $C$  issu de  $G$  ;
  - 4: Mettre le premier capteur  $s_i$  du graphe  $G$  dans un *lot\_connecté* ;
  - 5:  $nb = 1$  ;
  - 6: **while** capteur disponible dans le chromosome **do**
  - 7:   **for**  $i$  de 0 à  $n - 1$  **do**
  - 8:     **for**  $j$  de 1 à  $n$  **do**
  - 9:       Calculer  $dist$  entre  $s_i$  et chacun des  $s_j$  du chromosome ;
  - 10:       **if**  $dist(s_i, s_j) \leq r_s$  **then**
  - 11:          Mettre  $s_j$  dans *lot\_connecté* ;
  - 12:       **else**
  - 13:          Créer *lot\_non\_connecté* ;
  - 14:           $nb \leftarrow nb + 1$  ;
  - 15:          Mettre  $s_j$  dans *lot\_non\_connecté* ;
  - 16:          Calculer  $dist(s_i, s_j)$  ;
  - 17:       **end if**
  - 18:        $i \leftarrow i + 1$  ;
  - 19:     **end for**
  - 20:   **end for**
  - 21: **end while**
  - 22: Compter le nombre de lots ;
  - 23: **if**  $nb = 1$  **then**
  - 24:   Connectivité ;
  - 25: **else**
  - 26:   Pas de connectivité ;
  - 27: **end if**
-

## 4.6 Résultats expérimentaux et discussions

### 4.6.1 Résultats expérimentaux

Nous avons expérimenté l’algorithme proposé en utilisant MATLAB x64 sur un système avec Core (TM) i7, 3,6 GHz, 8 GRAM, Windows 10 comme plate-forme. Un code a été développé pour mettre en œuvre l’algorithme, et des cas de simulation sélectionnés ont été exécutés pour démontrer l’efficacité de la proposition. L’algorithme s’exécute automatiquement plusieurs fois, modifiant ou non le rayon des capteurs et calculant la couverture correspondante à l’intérieur de la zone d’intérêt avec la contrainte de connectivité. Au final, l’algorithme choisit le meilleur résultat. Nous avons effectué plusieurs simulations dans plusieurs cas qui montrent l’efficacité de l’algorithme à la fois dans le déploiement et le maintien de la connectivité. Tous les cas sont basés sur des cartes réelles de villes ou de parties de villes extraites de Google Maps. Pour les cas illustrés et détaillés ci-dessous, nous utilisons les paramètres indiqués dans le Tableau 4.1.

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

Paramètres	Valeurs
Nombre d’exécution	30
Nombre de capteurs	30
Rayon	35
Taille de la population	150
Nombre de génération	400
Taux de croisement	0.7
Taux de mutation	0.01

— **Premier cas :**

Pour les premiers tests, nous déployons des capteurs sur une zone de forme régulière de dimensions  $L \times l$ . Les objectifs restent inchangés. Au début du test, nous avons un déploiement initial et aléatoire des capteurs. A chaque itération, l’emplacement des capteurs est affiché, et à la fin, la meilleure population et la position finale des capteurs sont données, en fonction de la valeur de fitness et de la contrainte de connectivité. Les figures 4.6(a) et 4.6(b) montre respectivement la position finale et le schéma de connectivité des capteurs.

— **Deuxième cas :**

Pour le second test, nous déployons des capteurs sur certaines zones de forme irrégulière, en gardant les mêmes objectifs. Les figures 4.7(a), 4.8(a) et 4.9(a) montrent la position finale des capteurs dans chaque cas et les figures 4.7(b), 4.8(b) et 4.9(b) montrent le capteur schéma de connectivité correspondant à chaque positionnement final.

— **Troisième cas :**

Pour la troisième série de tests, nous créons une zone « sans intérêt » sur la carte en

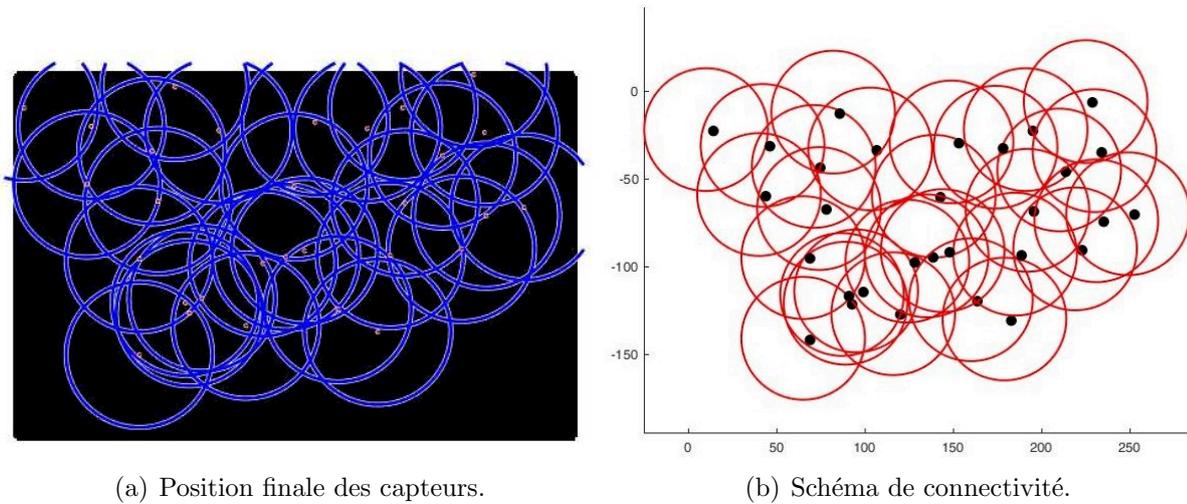


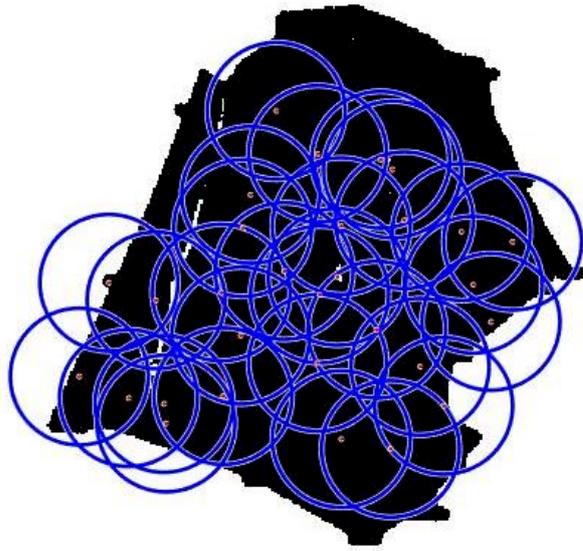
FIGURE 4.6 – Premier cas de déploiement.

utilisant la dernière zone de déploiement. Le but ici est de déployer des capteurs tout en gardant les objectifs énoncés précédemment. A titre d'illustration, dans le cas d'un déploiement dans une ville, il serait inutile de déployer des capteurs dans un lac ou une zone vide d'habitations. Les figures 4.10(a) et 4.11(a) montrent la position finale des capteurs dans chaque cas et les figures 4.10(b) et 4.11(b) montrent le schéma de connectivité des capteurs correspondant à chaque positionnement final.

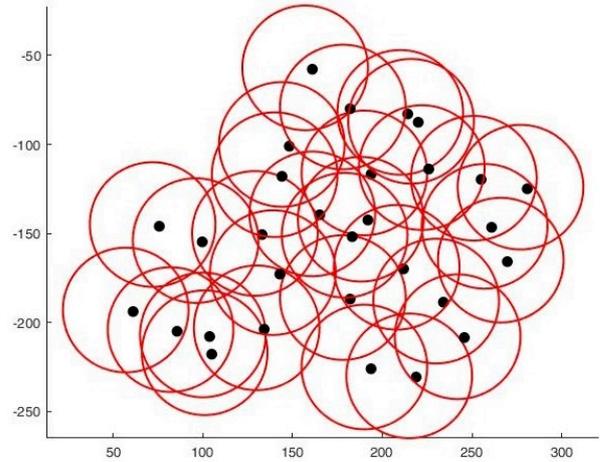
## 4.6.2 Discussion

Afin d'évaluer les performances de la proposition, une simulation approfondie est effectuée en tenant compte de nombreux scénarios de réseau différents, comme décrit dans la section précédente. Tous les scénarios considérés représentent des cartes réelles et sont simulés avec un champ de détection basé sur une grille d'au moins  $300 \times 300$ . Dans tous les scénarios de réseau, les nœuds capteurs sont placés au hasard dans la zone lors du premier déploiement. Dans notre simulation, nous avons pris une population initiale de 150 chromosomes. Cependant, il n'existe pas de règles universelles pour définir la taille de la population. Le critère de fin est pris comme le nombre maximum d'itérations qui dans notre cas est de 400. Cependant, on observe que l'algorithme converge avant d'atteindre le nombre maximum d'itérations. La portée de détection et de communication des nœuds capteurs est identique, comme précisé ci-dessus, et est égale à  $35m$ . Les simulations sont effectuées 30 fois pour chaque scénario, et le résultat moyen est considéré.

Tout d'abord, nous montrons la relation entre le taux de couverture et le nombre de capteurs dans le tableau ci-dessous. Comme la connectivité est toujours acquise, elle reste constante avec le rayon. Ainsi, dans ce tableau, deux variables entrent en jeu pour un même rayon, à savoir le taux de couverture dans la région d'intérêt (RI) et le taux de couverture en dehors.



(a) Position finale des capteurs.



(b) Schéma de connectivité.

FIGURE 4.7 – Premier déploiement sur une zone de forme irrégulière.

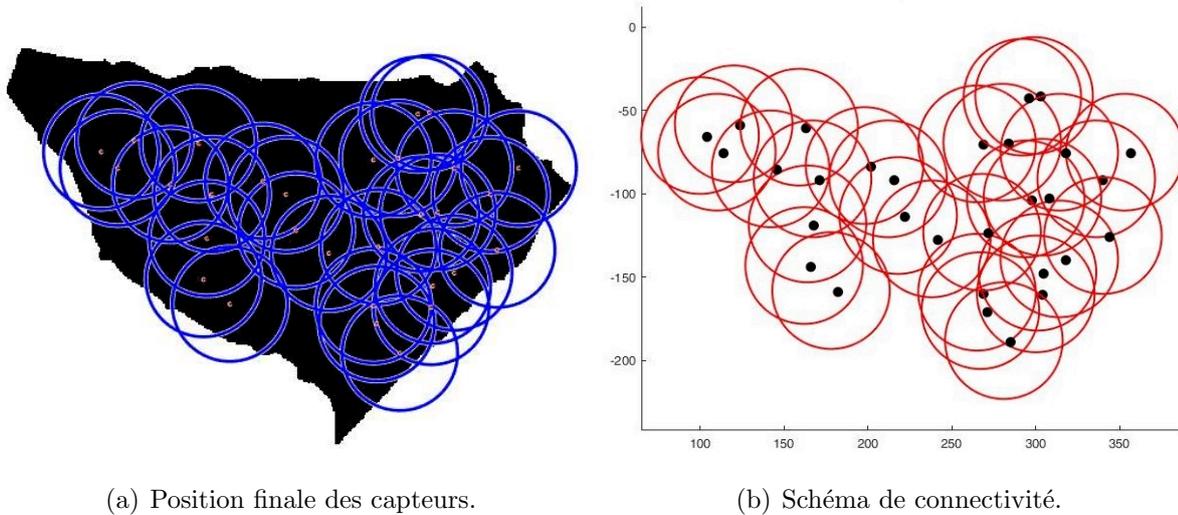
TABLE 4.2 – Pourcentage de couverture.

Nombre de capteurs	% couverture dans la RI	% couverture hors de la RI
10	43.84	0
20	82	0
40	96.52	2.1
60	98.22	1.78
80	99.9	0.1

En faisant varier le nombre de capteurs, on observe le pourcentage de couverture à l'intérieur de la zone d'intérêt et le pourcentage de couverture à l'extérieur. Comme la connectivité est toujours acquise, elle reste constante avec le rayon. En combinant ces valeurs, on s'aperçoit que la variation du pourcentage de couverture quand on passe de 40 capteurs à 60 ou de 60 à 80 n'est pas significative (1.7%). Le bon compromis en termes de nœuds et de couverture se situe entre [40–60–80].

Ensuite, nous avons exécuté plusieurs instances de test en faisant varier la taille de la population et le nombre d'itérations, puis nous avons considéré la moyenne des résultats. En faisant varier la taille de la population dans les tests, nous pouvons voir que nous obtenons une couverture de près de 99% avec une taille de population de 50. Nous avons ensuite fait varier le nombre d'itérations et constaté que nous avons atteint une convergence avec un taux de couverture supérieur à 98% pour 200 itérations.

Nous donnons également une performance temporelle de l'algorithme en utilisant les paramètres du Tableau 4.1. Nous faisons varier le nombre de générations et nous observons le temps mis par l'algorithme pour proposer une première bonne solution qui se résume



(a) Position finale des capteurs.

(b) Schéma de connectivité.

FIGURE 4.8 – Deuxième déploiement sur une zone de forme irrégulière

pour nous à un premier déploiement connecté. On note cette durée DPBS (durée pour première bonne solution). Ensuite, on observe le temps total mis pour parcourir toutes les générations. L'unité de temps est la seconde et les résultats sont présentés dans le Tableau 4.3.

TABLE 4.3 – Temps de simulation.

Nombre de générations	DPBS	Durée totale
20	8	48
40	31	105
80	100	213
160	105	420
320	89	840
640	34	1800

On observe qu'à 20 générations, il ne faut que 8 s à l'algorithme pour proposer une première bonne solution à la troisième génération et 48 s pour traverser les 20 générations en améliorant les propositions. A 40 générations, il faut 31 s pour la première bonne solution à la 13ème génération et 105 s en tout. A 80 générations, il faut compter 100 s pour la première bonne solution à la 37ème génération et 213 s en tout. A 160 générations, il faut 105 s pour une première bonne solution à la 41ème génération et 420 en tout. A 320 générations, il faut 89 s pour une première bonne solution à la 34ème génération et 840 s en tout. Enfin, à 640 générations, il faut 34 s pour la première bonne solution à la 14ème génération et 1800 s en tout.

Enfin, nous comparons notre proposition avec [65] l'un des travaux récents travaillant sur la couverture de zone et la connectivité. Comme ces auteurs traitent du problème de

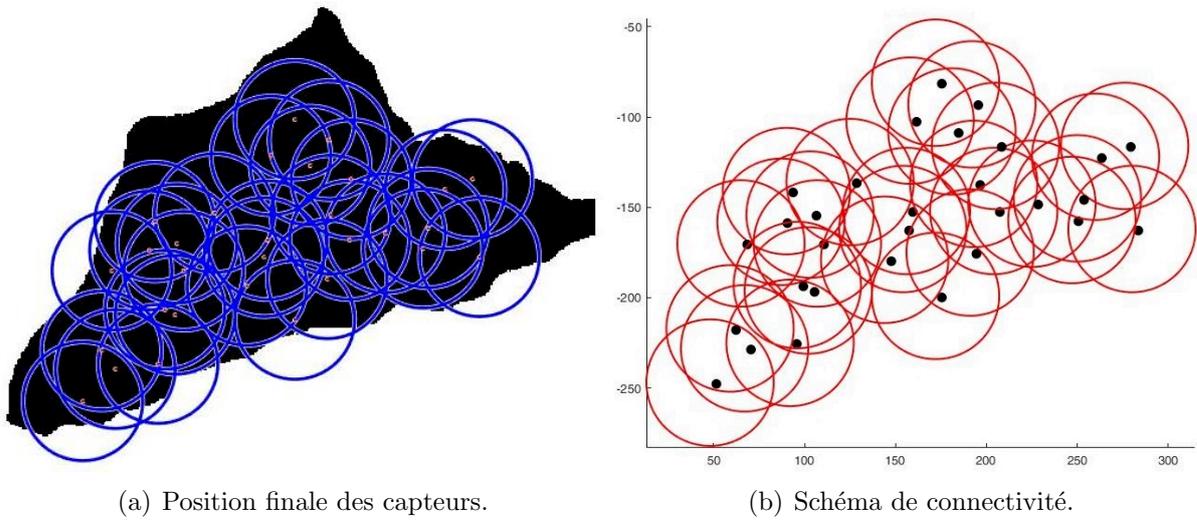


FIGURE 4.9 – Troisième déploiement sur une zone de forme irrégulière.

la couverture de la zone, en excluant ou en minimisant les chevauchements, une comparaison stricte est difficile. Deuxièmement, à notre connaissance, aucun des auteurs rencontrés dans la littérature ne traite le problème sous un autre angle que les formes régulières. Cependant, en comparant avec [65], et sur la base des résultats fournis par les auteurs ; on voit que notre proposition offre une meilleure solution en termes de rapport couverture/surface couverte. En effet, pour une zone de 100, ils atteignent 97,25% de couverture avec un nombre de capteurs compris entre 30 et 50, alors que pour une zone plus large, on dépasse ce pourcentage avec autant de capteurs. Le Tableau 4.4 résume une brève comparaison faite entre les deux travaux et les figures 4.12(a) et 4.12(b) montrent les résultats que nous avons obtenus en termes de schéma de déploiement et de connectivité et en utilisant leurs paramètres.

## 4.7 Conclusion

Ce chapitre propose un schéma basé sur un algorithme génétique pour trouver les meilleures positions pour le placement des nœuds capteurs dans les réseaux de capteurs sans fil, en respectant la couverture et la connectivité entre les nœuds capteurs. Nous cherchions à couvrir toutes formes de zones en maximisant la couverture tout en imposant une contrainte de connectivité entre les capteurs. Nous avons d'abord présenté la formulation de programmation linéaire du problème. Puis, sur la base de la représentation des chromosomes et des opérateurs de sélection, croisement et mutation que nous avons déjà utilisés, nous avons présenté l'évaluation de la couverture et celle de la connectivité qui est faite. Une solution qui maximise la couverture sans respecter la contrainte de la connectivité ne sera pas considérée comme bonne solution et sera donc au fil des générations, écartées. Notre proposition a été largement simulée en faisant varier le nombre de cas de test et en

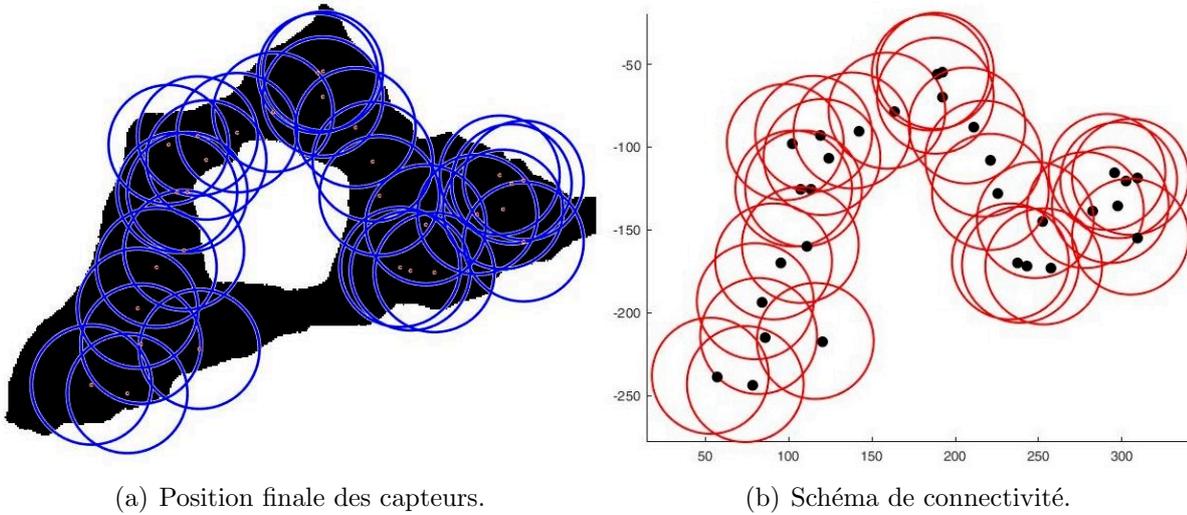
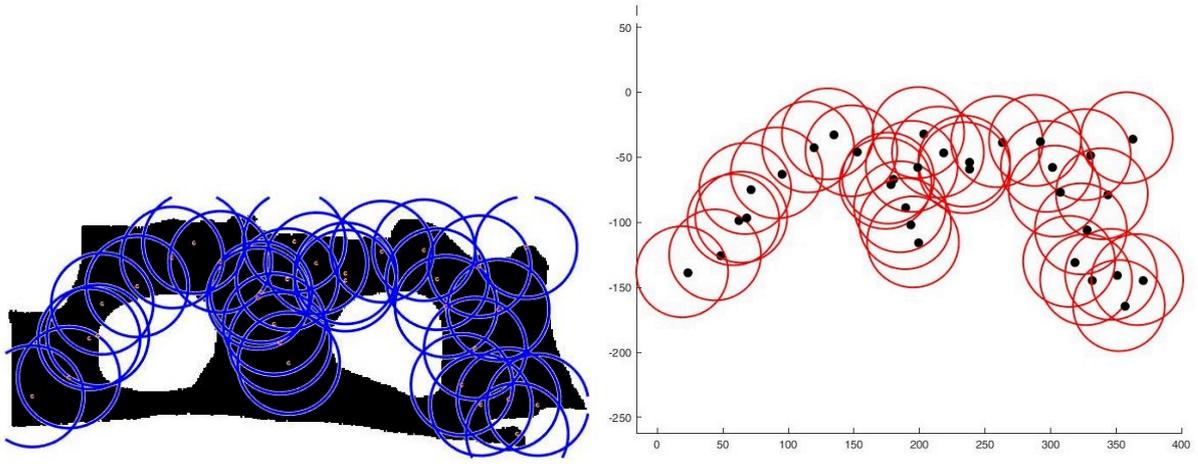


FIGURE 4.10 – Déploiement avec une zone sans intérêt.

utilisant plusieurs scénarios. Contrairement aux autres méthodes présentées dans la revue de littérature, la nôtre est placée dans une situation réelle de déploiement et considère le chevauchement entre un ou plusieurs capteurs pour calculer et donner le taux de couverture maximal exact, en se concentrant sur les zones d'intérêt tout en maintenant une connectivité complète. Plusieurs tests ont été effectués sur des zones de formes différentes, allant de régulières à irrégulières. Ces tests montrent que nous atteignons un taux de couverture allant jusqu'à 95% pour des zones à formes irrégulières et 100% pour une zone à forme régulière. Les résultats montrent que l'algorithme est efficace et que l'approche proposée satisfait les objectifs recherchés.

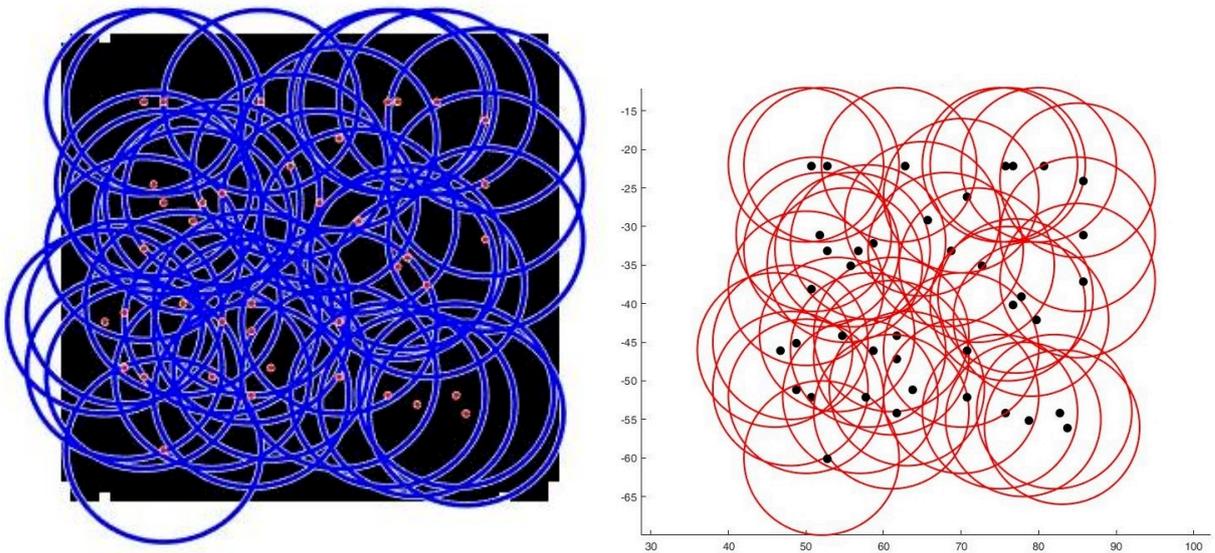
La proposition faite dans ce chapitre, a un large éventail d'applications, dans les villes intelligentes par exemple. Cependant, dans cet chapitre, nous n'avons pas abordé la question de la rupture de la connectivité ou de l'efficacité énergétique dans notre déploiement. Dans nos travaux futurs, nous développerons un schéma encore plus efficace qui prendra en compte la rupture de connectivité, l'énergie, la redondance et enfin le routage des données détectées.



(a) Position finale des capteurs.

(b) Schéma de connectivité.

FIGURE 4.11 – Déploiement avec deux zones sans intérêt.



(a) Position finale des capteurs.

(b) Schéma de connectivité.

FIGURE 4.12 – Déploiement comparatif.

TABLE 4.4 – Paramètres de comparaison.

<b>Paramètres</b>	<b>GAFACM</b>	<b>IDDT-GA</b>
Déploiement sous forme régulière	Oui	Oui
Déploiement sous forme irrégulière	Oui	Non
Déploiement avec chevauchement	Oui	Minimiser les chevauchements
Taille de la zone de déploiement	100 × 100	100 × 100
Nombre de capteurs	40	45
Portée de détection	10	10
Taille de la population	30	30
Nombre de génération	500	500
Pourcentage de croisement	0.7	0.7
Pourcentage de mutation	0.01	0.01
Taux de couverture	100%	97.25
Connectivité complète	Oui	Dépend du nombre de capteurs

## CHAPITRE 5

# ANALYSE DES PERFORMANCES D'UN RÉSEAU NB-IOT POUR LA SURVEILLANCE DES PATIENTS DANS LES ZONES RURALES

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>85</b>
<b>5.2</b>	<b>Aperçu du contexte NB-IoT</b>	<b>87</b>
5.2.1	Liaison descendantes	89
5.2.2	Liaison ascendantes	89
<b>5.3</b>	<b>Système de surveillance des soins de santé</b>	<b>89</b>
5.3.1	Méthodologie, données et modèle du système	91
<b>5.4</b>	<b>Résultats et discussion</b>	<b>93</b>
<b>5.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>93</b>

---

## 5.1 Introduction

Le dernier quart de siècle a été une période de changements et de progrès sans précédent dans les pays en développement. Malgré ces progrès impressionnants, l'accès à la santé reste parfois limité pour de nombreuses personnes, en particulier dans les zones rurales et dans les zones limitrophes des grandes villes. Une zone rurale peut être défini de diverses manières, en fonction par exemple de la densité de la population ou de la situation géographique. Census Bureau la définit comme ce qui n'est pas urbain - c'est-à-dire qu'après avoir défini les zones urbaines individuelles, les zones qui restent sont rurales [103]. Dans les pays à faible et moyen revenu, le secteur de la santé fait face à certains grands défis qui sont entre autre une pénurie de personnel de santé, parfois un manque de centres de santé et enfin un manque de compétences suffisant dans les centres

de santé existants. Ces problèmes sont plus hétérogènes dans les zones rurales et souvent plus amplifiés que dans les zones urbaines. Ils compromettent entre autre, la fourniture, la continuité et la disponibilité des soins et des services pour les habitants de ces zones. L'une des conséquences, est que les populations sont confrontées à l'insuffisance des soins de santé en raison de la pénurie ou de la mauvaise répartition des ressources humaines et de l'insuffisance des services spécialistes. Les spécialistes n'ont souvent pas une " masse critique " de patients suffisante pour être économiquement rentables pour desservir une région à la fois peu peuplée et éloignée. La situation peut être particulièrement difficile pour les patients atteints de certaines maladies ou pour les personnes âgées.

L'utilisation généralisée d'appareils mobiles, de capteurs et de réseaux de capteurs sans fil et le développement de l'Internet des objets (IoT) ont motivé les sociétés médicales et de soins de santé à utiliser l'IoT pour surveiller, collecter des données et communiquer avec les patients à l'aide des réseaux corporels sans fil (Wireless Body Area Networks - WBAN)[44, 104]. Les données collectées servent au diagnostic médical et sont obtenus directement à partir du corps des patients. Ceci permet de grandement simplifier les processus et présente d'énormes avantages à la fois pour les patients et les fournisseurs de soins de santé. En effet, un réseau d'information efficace, sécurisé et inter-opérable construit avec les inclusions de l'informatique de la santé assure la santé et le bien-être des patients car ils sont maintenus au centre de tout le système. Les solutions de technologies de l'information et de la communication, telles que la cybersanté et la télé-médecine par exemple peuvent donc être considérées comme des moyens pour combler le fossé numérique entre les centres de santé ruraux et urbains et pour remédier aux carences du secteur de la santé dans les zones rurales [105].

Dans les chapitres précédents, nous avons expliqué et montré l'utilisation et l'impact des RCSFs d'une manière générale. Dans ce chapitre nous proposons une illustration des RCSFs basée sur l'utilisation de la technologie de communication NB-IoT présentée dans le chapitre 1. Les principales applications cibles utilisées avec le NB-IoT comprennent entre autre les villes intelligentes, les applications personnelles IoT, les réseaux intelligents, la surveillance industrielle et/ou environnementale, l'agriculture, etc. Cette technologie de communication peut donc être utilisée en application de nos travaux des chapitres 3 et 4. Nous nous concentrons donc sur l'aspect collaboration/communication entre les capteurs à travers l'utilisation du NB-IoT et proposons un réseau de capteurs pour coordonner le suivi des patients dans une zone rurale du Bénin précisément dans la commune de Djidja à partir d'un centre de santé installé dans cette zone. Les principales contributions et résultats de ce travail sont :

- concevoir un système de réseau de capteurs sans fil NB-IOT pour coordonner le suivi des patients dans une zone rurale du Bénin ;
- surveiller à distance l'état des patients critiques ;
- permettre la collecte automatique de données multimodales, leur stockage et leur traitement à l'aide d'un seul système au fil du temps ;

- augmenter la réactivité du personnel de santé.

## 5.2 Aperçu du contexte NB-IoT

Dans le cadre du projet de partenariat de troisième génération, le 3GPP a introduit en juin 2016 une nouvelle norme de technologie cellulaire appelée Internet des objets à bande étroite (Narrow-Band Internet of things - NB-IoT), pour fournir des services IoT via des réseaux cellulaires étendus [29, 35, 36, 38, 3]. Le NB-IoT est basé sur l'évolution à long terme (LTE) et fonctionne donc dans le spectre sous licence [3]. Il est conçu pour prendre en compte la plupart des exigences de service IoT, y compris une très bonne couverture intérieure, la prise en charge d'un grand nombre d'appareils connectés, un très faible coût de connectivité, une faible consommation d'énergie et une architecture réseau optimisée. Contrairement aux autres technologies IoT sans licence qui nécessitent le déploiement de nouvelles infrastructures, NB-IoT permet une installation facile et à moindre coût du réseau, car il réutilise les infrastructures LTE existantes [3].

NB-IoT hérite donc de LTE, la plupart de ses fonctionnalités ainsi que ses canaux et signaux essentiels [29, 39, 3]. Cependant, la complexité des canaux et signaux de LTE a été réduite afin de respecter les contraintes de faible coût et de faible puissance des modules d'équipement utilisateur NB-IoT. Le nombre de canaux et de signaux a été réduit et ils ont été adaptés pour être conforme à la nouvelle structure de trame NB-IoT [3]. Le système a été conçu pour occuper une bande de fréquences de 180 kHz (correspondant à un bloc de ressources dans le système LTE) et pour gérer un nombre élevé de répétitions afin d'obtenir des transmissions à longue portée. Trois modes de fonctionnement, résumés sur la figure 5.1 ont été définis par le 3GPP pour le NB-IoT [29, 40, 37, 38, 1, 106, 3]. Il s'agit du :

- mode intra-bande : le signal NB-IoT occupe un PRB de la bande passante LTE ;
- mode bande de garde : le signal NB-IoT occupe un PRB parmi les PRB de bande de garde inutilisés de la bande passante LTE ;
- mode autonome : le signal NB-IoT est destiné à occuper le spectre libéré du système global de communications mobiles (GSM). Dans ce cas, le signal NB-IoT occupe toujours 180 kHz de la porteuse GSM 200 kHz, avec 10 kHz de garde de bande des deux côtés du spectre.

Le système NB-IoT ayant été conçu sur la base d'une réutilisation extensive du système LTE [3], il bénéficie d'un déploiement rapide et flexible sur les infrastructures de réseau cellulaire LTE, tout en assurant la coexistence des deux technologies. En fait, NB-IoT réutilise les schémas de modulation pour les transmissions en liaison descendante et montante. Il s'agit de l'accès multiple par répartition en fréquence orthogonale (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access* - OFDMA) pour la liaison descendante et l'accès multiple par répartition en fréquence à porteuse unique (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access* - SCFDMA) pour la liaison montante [29, 39, 3]. En mode de fonction-

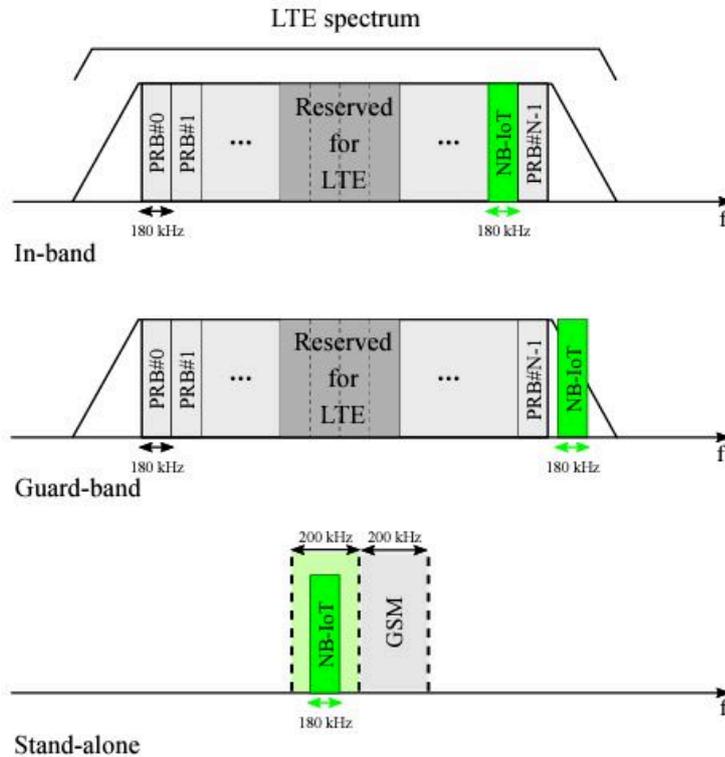


FIGURE 5.1 – Mode de fonctionnement du NB-IoT [3]

nement autonome, NB-IoT peut occuper un canal GSM (200 kHz) alors que pour les modes de fonctionnement en bande et en bande de garde, il utilisera un bloc de ressources physiques de LTE (180 kHz).

Les objectifs de conception de NB-IoT comprennent des dispositifs à faible coût, une couverture élevée (amélioration de 20 dB par rapport au GPRS), une longue durée de vie de la batterie (plus de 10 ans), une capacité massive et une latence fortement réduite [107]. Bien qu'exploitant les fonctionnalités de base de LTE, les canaux de signalisation et de contrôle de NB-IoT sont nouveaux [29, 37, 38, 1]. En effet, le système a d'abord été conçu pour fonctionner dans un mode basé sur le duplexage par répartition en fréquence (*Frequency-division duplexing- FDD*) dans la version 13 du 3GPP [3]. Le duplexage par répartition en fréquence (FDD) est une technique où des bandes de fréquences distinctes sont utilisées du côté de l'émetteur et du récepteur. Dans le cadre du NB-IoT, cela signifie que les transmissions en liaison descendante et montante sont effectuées dans des bandes de fréquences complètement séparées. Parce que la technique FDD utilise différentes bandes de fréquences pour les opérations d'envoi et de réception, les signaux de données d'envoi et de réception n'interfèrent pas entre eux. Cependant, le transfert des messages dans certains sous-canaux n'est qu'unidirectionnel. L'utilisateur ne peut pas effectuer les deux opérations (transmission et réception) simultanément [29, 37, 108].

### 5.2.1 Liaison descendantes

La brève structure de trame des deux liaisons descendantes ainsi que les canaux de contrôle, extraites de la norme 3GPP, sont les suivantes : la structure de trame de la liaison descendante NB-IoT est similaire à celle du LTE dans le domaine temporel avec 10 *ms* de longueur. Chaque trame est constituée de 10 sous-frames de 1 *ms* de longueur et chaque sous-frame est constituée de deux fentes de sept symboles OFDM. Dans le domaine des fréquences, elle est constituée d'un bloc de ressources physiques (Physical Resources Block - PRB) avec 12 sous-porteuses ayant 15 kHz et un préfixe cyclique normal (CP) [38, 1, 3]. Contrairement au LTE, le NB-IoT possède deux signaux physiques et trois canaux physiques qui sont les suivants :

- point signal de référence à bande étroite (NRS) ;
- signaux de synchronisation primaire et secondaire à bande étroite (NPSS et NSSS) ;
- canal de contrôle physique de la liaison descendante à bande étroite (NPDCCH) ;
- canal physique partagé de liaison descendante à bande étroite (NPDSCH).

### 5.2.2 Liaison ascendantes

Sur la liaison montante, le NB-IoT prend en charge les transmissions à tonalité unique et à tonalité multiple. La transmission multitonale utilise le même schéma SC-FDMA avec un espacement de sous-porteuses de 15 kHz. Toutefois, la transmission monotone prend en charge les sous-porteuses de 15 kHz et de 3,75 kHz. La fréquence de 15 kHz a une numérotique similaire à celle du LTE. Par contre, la durée de symbole de l'espacement des sous-porteuses de 3,5 kHz est quatre fois plus longue que celle de la fréquence de 15 kHz, ce qui donne une longueur de créneau de 2 ms. En outre, dans la liaison montante NB-IoT, une nouvelle unité de cartographie des ressources est définie comme une unité de ressource (UR). L'UR est une combinaison d'un certain nombre de sous-porteuses (domaine fréquentiel) et d'un certain nombre d'intervalles (domaine temporel). Pour la liaison montante, le NB-IoT dispose d'un signal physique et de deux canaux physiques qui sont les suivants :

- signal de référence de démodulation (DMRS)
- canal d'accès physique aléatoire à bande étroite (NPRACH)
- canal partagé de liaison montante à bande étroite (NPUSCH)

## 5.3 Système de surveillance des soins de santé

Dans les hôpitaux, la température du corps d'un patient, par exemple, doit être surveillée en permanence. Ceci est généralement fait par les membres du personnel de l'hôpital. Ils surveillent et relèvent à une certaine fréquence, la température du corps du patient. La surveillance de la santé consiste à surveiller une personne afin de déceler tout changement dans son état de santé. Les RCSFs sont utilisés aujourd'hui dans la médecine

pour surveiller certains signes vitaux comme la température, la pression artérielle ou le rythme cardiaque. Cette utilisation permet non seulement d'améliorer la qualité de vie des patients, mais aussi le suivi des patients en temps réel et de pouvoir anticiper les décisions.

L'utilisation de NB-IoT permet d'utiliser une station de base cellulaire déjà déployée bénéficiant d'installations déjà existantes. Le NB-IoT offre aux terminaux d'utilisateurs finaux une longue durée de vie. Toutefois, chaque application se caractérise par des exigences de couverture et de performance différentes. Par exemple, pour un patient et compte tenu des informations captées, des débits de données allant jusqu'à 2 Kbps par capteur peuvent être nécessaires. Dans notre modèle de conception du système de surveillance des soins de santé, nous considérons chaque capteur comme noeud unique. Un noeud capteur peut être un capteur de température, de fréquence respiratoire, etc. Par conséquent, chaque noeud transmet des données à l'unité centrale de traitement avec des exigences de latence et de débit de données [109]. Pour chaque patient, plusieurs liaisons de transmission sont nécessaires avec la station de base. Le trafic dans le système de surveillance des soins de santé est basé sur plusieurs capteurs utilisant des paquets d'informations de tailles et d'intervalles de temps différents. Pour faire notre analyse, nous supposons que le patient est dans un état critique qui nécessite une surveillance constante. Tous les capteurs communiquent directement avec la station de base. Les données peuvent donc être vues et traitées en temps réel par le personnel de santé. La figure 5.2 montre le modèle proposé.

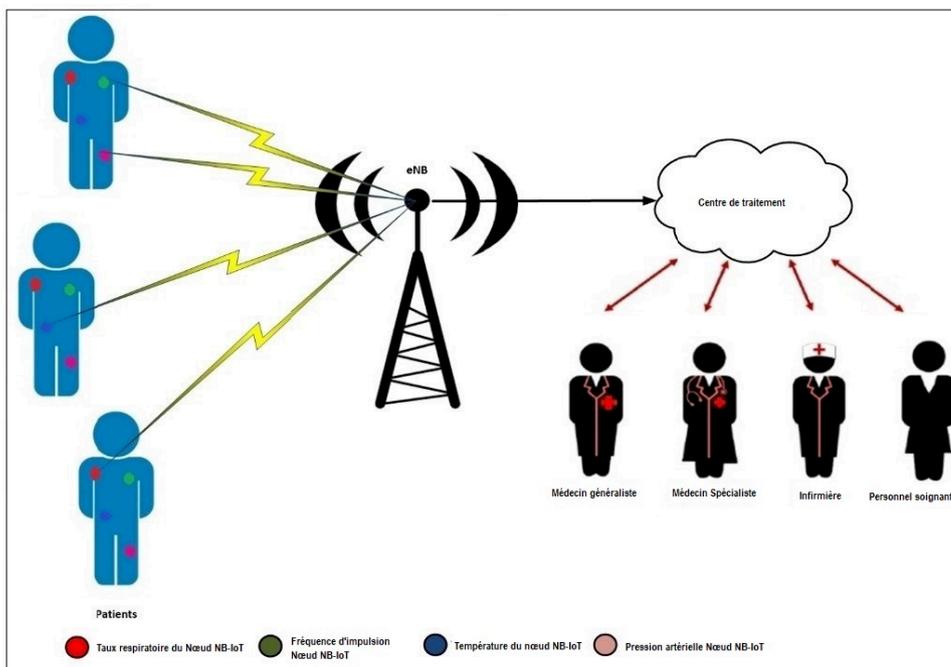


FIGURE 5.2 – Aperçu du modèle proposé

### 5.3.1 Méthodologie, données et modèle du système

Pour effectuer l'analyse du rendement, nous avons examiné les déploiements dans la bande et les déploiements autonomes de NB-IoT avec une bande passante de 180 kHz. Le scénario est une grille régulière de sites tri-sectoriels avec des distances de 1732m. Le mode dans la bande, utilisé pour les cas où les services cellulaires sont présents et où NB-IoT est positionné dans le transporteur LTE partage les ressources LTE. Ce mode de fonctionnement est peut-être le plus rentable et le plus transparent pour les services mobiles opérateurs, puisqu'il ne nécessite aucune modification matérielle du réseau d'accès radio et utilise efficacement le spectre ressources pour les services LTE ou NB-IoT, en fonction de la demande des utilisateurs ou des appareils mobiles.

La figure 5.3 illustre le déploiement autonome et celui en bande.

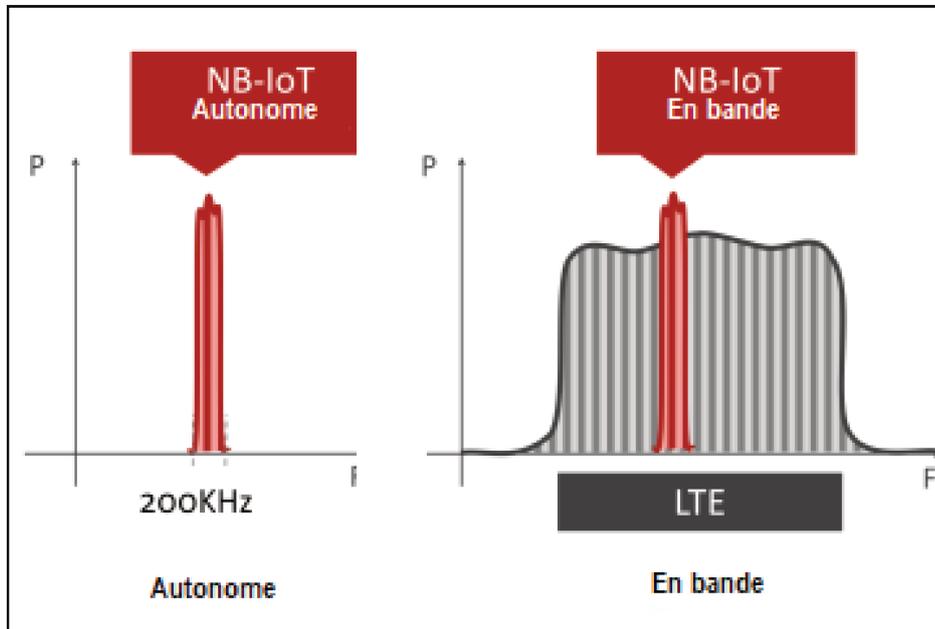


FIGURE 5.3 – Déploiement autonome et en bande

Les autres hypothèses de simulation qui suivent sont présentées dans le Tableau 5.1. La largeur de bande complète est de 180 kHz, soit 12 sous-porteuses avec un espacement de sous-porteuses de 15 kHz sur la liaison descendante et la liaison montante. Pour la liaison montante, vu que les performances sont moins bonnes que la tonalité unique (3,75 kHz ou 15 kHz), la performance obtenue dans cette étude donne des limites inférieures aux résultats des travaux réalisés avec des systèmes NB-IoT à tonalité unique. Selon [108], il est aussi plus réaliste d'étudier les performances de la liaison montante NB-IoT.

Le débit de données  $R_{i,n}$  pour un noeud  $i$  lorsque le PRB  $n_{th}$  est attribué et donné par :

$$R_{i,n} = B \log_2(1 + SINR_{i,n}) \quad (5.1)$$

où  $B$  est la largeur de bande de transmission assignée et  $SINR_{i,n}$  est le rapport signal interférence plus bruit (SINR) pour le noeud  $i$  sur  $n_{th}$  PRB est donné par :

$$SINR_{i,n} = \frac{P_n h_{i,n}}{I_{i,n} + N_0} \quad (5.2)$$

où  $P_n$  est la puissance d'émission et  $h_{i,n}$  est le gain de canal entre le noeud  $i$  et la station de base sur le  $n$ -ième PRB.  $I_{i,n}$  est le brouillage subi par le noeud  $i$  et nous le supposons négligeable dans notre analyse.  $N_0$  est la densité du spectre de puissance de bruit. En fonction du SINR, le MCL<sup>15</sup> correspondant est calculé et la relation entre le SINR et le MCL est donnée dans [106] par l'équation 5.3 :

$$TargetSINR = T_{xpower} + 174 - Noisefigure - 10\log_{10}(B) - MCL \quad (5.3)$$

La perte du chemin (path loss) est donné par :

$$PathLoss = I + 37.6\log_{10}(R) \quad (5.4)$$

$R$  en Kilometre avec  $I=120.9$  pour 900 Mhz

L'heure d'arrivée est répartie sur trois catégories de transmissions périodiques avec des heures d'arrivée constantes de 1 jour, 2 heures, 1 heure et 30 minutes. Les proportions respectives des dispositifs sont de 46%, 47%, 15% et 5% [109]. Le taux moyen d'arrivée des rapports par appareil est donné par l'équation 5.5 :

$$\frac{0.46}{86400s} + \frac{0.47}{7200s} + \frac{0.15}{3600s} + \frac{0.005}{1800s} = 129.6 * 10^{-6} \frac{packet}{s/cell} \quad (5.5)$$

Le taux total de paquets de liaison montante dans le réseau est :

$$21cell/network * 6.82 \frac{packet}{s/cell} = 143.0 \frac{packet}{s/network} \quad (5.6)$$

Le calcul inverse entre le débit de paquets du réseau,  $R$  [rapports/s/cellule], et le nombre de périphériques est :

$$\frac{R \frac{packet}{s/cell}}{129.6 * 10^{-6} \frac{packet}{s/device}} = 7716 * R.device/cell \quad (5.7)$$

---

15. Maximum Coupling Loss

TABLE 5.1 – Hypothèse de simulation

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
Fréquence de simulation	24 GHz
Bande passante	900 MHz
Distance inter-cellule	1732 m
Puissance de transmission de eNB	32 dBm
Puissance de transmission d'un UE	23 dBm
Déviatoin standard d'ombrage	8 dB
Distance de corrélation d'ombrage	110m
Corrélation d'ombrage entre cellules sites	0.5
Corrélation d'ombrage entre les secteurs des cellules	1.0
Perte de pénétration du bâtiment	40dB
Bruit au niveau de l'équipement de l'utilisateur	3dB
Densité spectrale de puissance de bruit	-174dBm/Hz

## 5.4 Résultats et discussion

Dans la présente section, le rendement du système NB-IoT au niveau du système est évalué à l'aide de simulations de Monte Carlo en ce qui concerne le débit réel et le nombre de périphériques pris en charge. Avec les paramètres indiqués dans le tableau 5.1, la simulation est exécutée pour des déploiements autonomes, pour plus de 750 échantillons aléatoires. La figure 5.4 illustre la distribution cumulative (CDF) du débit effectif moyen des différents déploiements en bande et autonome. Le débit effectif est défini comme le nombre de bits d'information transmis par seconde avec tous les en-têtes d'information de contrôle. En déploiement dans la bande, la performance de la batterie est fortement dégradée en raison de la présence d'informations de contrôle du LTE et des différentes interférences dues aux deux systèmes coexistants. La figure 5.5 montre le nombre moyen de patients qui peuvent être traités dans différents scénarios de déploiement. On peut voir que le déploiement en mode autonome, permet d'améliorer de façon importante le flux et le nombre de patients pris en charge.

## 5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une analyse détaillée du rendement propre à une application d'outil de surveillance des soins de santé en milieu rural. L'analyse réalisée montre qu'avec le déploiement autonome, on observe un gain de débit important et que le système peut supporter un plus grand nombre de patients par cellule, en comparaison avec le déploiement dans la bande. À partir de ces résultats, nous pouvons conclure que la technologie NB-IoT, grâce à ces caractéristiques, est adaptée à ce type de système. En termes de perspectives, nous pensons travailler à faire une simulation avec d'autres

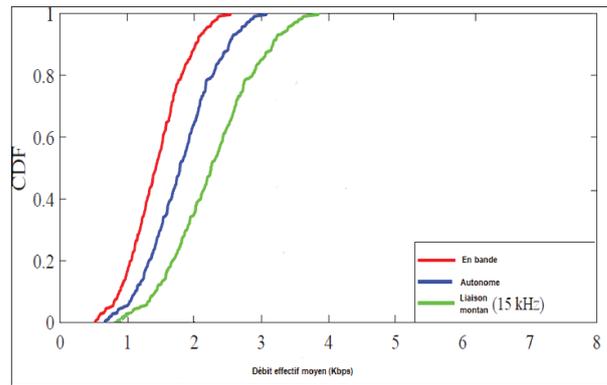


FIGURE 5.4 – Débit en mode autonome et en bande

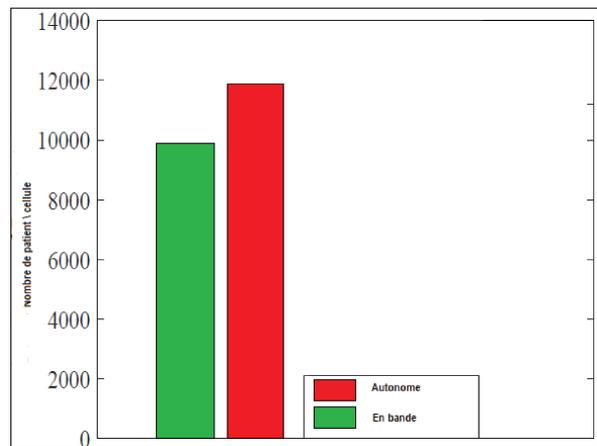


FIGURE 5.5 – Nombre de patient par cellule

technologies de communication présentées dans le chapitre 1 pour dégager celle qui fournit les meilleurs rendements.

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

### Conclusion générale

Les besoins de plus en plus accrus d'observation et de contrôle des phénomènes physiques et biologiques ont permis le développement rapide des réseaux de capteurs sans fils. Avec leur immiscions dans tous les domaines, l'importance des RCSF n'est plus à démontrer. Ils constituent aujourd'hui une technologie qui impacte le monde et notre manière de vivre et de travailler. Cependant, en dépit de leur utilisation massive et des solutions qu'ils apportent, ce type de réseau fait face à plusieurs contraintes que nous avons mis en exergue.

Dans cette thèse, nous avons abordé et étudié le problème du déploiement de réseaux de capteurs sans fil en utilisant une approche d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques. Nous avons proposé une solution de déploiement qui répond à deux objectifs fondamentaux des RCSF. Nous avons commencé par faire un état de l'art sur l'IoT et ensuite présenté les différents aspects en lien avec la compréhension des problématiques liées au déploiement des réseaux de capteur sans fils. De cette présentation, il est ressorti plusieurs objectifs à satisfaire lors du déploiement du réseau. Parmi ces objectifs, nous nous sommes concentrés sur deux principaux que sont la couverture de zone et la connectivité entre capteurs.

La première partie de nos travaux a consisté à optimiser la couverture d'une zone de forme régulière avec un nombre donné de capteurs. L'une des difficultés dans ce type de déploiement est d'évaluer de façon précise la proportion de zone couverte par les capteurs, lorsqu'il existe un ou des recouvrement(s) de faisceaux de couverture des capteurs. Nous avons proposé une solution de déploiement qui se base sur les algorithmes génétiques et qui introduit une fonction d'évaluation différente de celles proposées dans la littérature. Cette fonction d'évaluation nous permet de nous mettre en situation réelle et de tenir compte des dits recouvrements. Cette nouvelle méthode d'évaluer notre déploiement, nous a permis d'optimiser la couverture de zone et de donner avec précision le pourcentage de la zone d'intérêt couverte par les capteurs.

En nous servant du même principe que la fonction d'évaluation utilisée dans la première partie de nos travaux, nous avons couvert des zones d'intérêts de diverses formes géométriques. Étant donné que nous pouvions couvrir au mieux une zone d'intérêt, quelque soit sa forme, nous avons ensuite introduit des zones de non intérêt. Ces zones, présentes à l'intérieur des zones de déploiement, ne nécessitent pas de présence de capteurs. Ceci complexifie le déploiement, mais se justifie par le fait que dans un cadre de déploiement réel, il peut arriver que toute la zone d'intérêt n'ai pas besoin de couverture (une zone non viable par exemple dans le cas d'une ville). Enfin, nous avons appliqué la contrainte de connectivité entre les capteurs obligeant tous les capteurs d'une même solution à être connectés.

Enfin, dans la dernière partie, nous proposons et présentons un réseau de capteurs NB-IOT pour coordonner le suivi des patients dans une zone rurale et ce, à partir d'un centre de santé installé dans cette zone. Cette partie présente une analyse détaillée du rendement propre à cette application d'outil de surveillance des soins de santé en milieu rural et mets en exergue la technologie NB-IOT présentée dans cette thèse.

## Perspectives

Notre travail s'est concentré sur l'atteinte de deux objectifs principaux. L'optimisation de la couverture de zone et la connectivité entre les capteurs. Toutefois, il existe plusieurs autres objectifs, tous essentiels au bon fonctionnement des RCSF.

Les perspectives que nos travaux ouvrent sont nombreuses, tant les applications des RCSFs sont multiples et divers. Celles envisageables pour nous, en prolongement direct de cette thèse concernent 2 objectifs importants : la tolérance aux pannes et la transmission des données.

Il serait normal d'ajouter la tolérance aux pannes aux travaux du chapitre 4. En effet, les RCSF devraient être de nature indépendante, auto-organisée et auto-réparatrice. Cependant, la gestion des RCSF est très subjective pour une adaptation efficace aux situations de panne. Pour la plupart des applications de RCSF, la fiabilité point à point n'est pas toujours l'objectif principal. Par contre, la livraison fiable d'événements d'intérêt au noeud puits doit être absolument garantie. La nature de la communication dans les réseaux de capteurs étant imprévisible et sujette aux pannes, il est essentiel de fournir des techniques tolérantes aux pannes pour les applications des RCSFs. Ces pannes surviennent généralement à cause de la fragilité des nœuds capteurs, l'épuisement de la batterie ou de la destruction des noeuds par un événement externe [101, 100, 110, 111]. Dans la méthode de déploiement, nous pourrions intégrer la recherche des noeuds critiques. À l'exemple de [101], un noeud sera considéré comme critique si sa cessation d'activité fragilise le réseau et son activité. Ceci permettra dans un premier temps de détecter les "trous" dans le réseau et par conséquent les pannes. Dans un second temps, nous pourrions proposer une solution en introduisant des noeuds mobiles à l'exemple les travaux de [102, 100] ou

en utilisant certains noeuds uniquement comme des noeuds de redondance.

L'existence et la durée de vie du réseau, sont intimement liées à l'approvisionnement énergétique des capteurs et à leur consommation d'énergie. Une des tâches importantes lors du déploiement des RCSF est donc de pouvoir optimiser au mieux la consommation d'énergie des capteurs. Une des techniques longtemps utilisées est de mettre les noeuds capteurs en mode actif ou non. Le mode actif suppose que le noeud capteur est en état de récupérer des données tandis que dans le mode non actif il est au repos. Cette solution pose toutefois certains problèmes. Ainsi, [112] présente une analyse complète de la stratégie d'efficacité énergétique dans les RCSF statiques qui ne sont pas équipés de modules de récolte d'énergie tandis que [67] et [70] se penchent de façon spécifique sur la consommation énergétique des RCSF en proposant des déploiements efficaces appliqués à certains domaines d'application. Dans notre cas, nous pourrions proposer une allocation dynamique des ressources du réseau en fonction des tâches périodiques des capteurs [113]. Cette allocation se baserait par exemple sur le nombre de capteurs voisins actifs. A l'exemple de l'élection de leader pour un cluster de noeuds capteurs, il s'agira en fonction du nombre de voisins actifs et des tâches à faire décider pour un capteur de se mettre en retrait du réseau.

L'objectif principal d'un RCSF est l'envoi d'informations recueillies grâce aux noeuds capteurs. Le routage dans un réseau de capteur sans fil doit permettre d'effectuer la communication de données tout en essayant de prolonger la durée de vie du réseau et de fournir une qualité de service élevée lors de la livraison des données. Sur la base de la structure du réseau, les auteurs de [114] classent le routage en plusieurs catégories à savoir : le routage basé sur les données, le routage basé sur l'emplacement, le routage basé sur le groupe ou le routage basé sur la hiérarchie. Dans nos futurs travaux nous implémenterons l'une des techniques de routage qui servent à transmettre les données dans le réseau de capteur sans fil.



## LISTES DES PUBLICATIONS

### **Journal avec comité de lecture :**

- Tossa, F., Abdou, W., Ansari, K., Ezin, E. C., & Gouton, P. (2022). Area Coverage Maximization under Connectivity Constraint in Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 22(5), 1712. JCR - Q1 / CiteScore - Q1 / Impact factor : 3.576.

### **Conférences**

- Tossa, F., Abdou, W., Ezin, E. C., & Gouton, P. (2020, June). Improving coverage area in sensor deployment using genetic algorithm. In *International Conference on Computational Science* (pp. 398-408). Springer, Cham.
- Atchome, A. M., Sherazi, H. H. R., Alahassa, R., Tossa, F., Edoh, T. O., Grieco, L. A., & Vianou, A. C. (2019, December). A Hybrid Network Model Embracing NB-IoT and D2D Communications : Stochastic Geometry Analysis. In *International Conference on e-Infrastructure and e-Services for Developing Countries* (pp. 154-165). Springer, Cham.
- Atchome, A. M., Tossa, F. U., Edoh, T. O., Abdou, W., Assogba, M. K., Ezin, E. C., & Gouton, P. (2018). Performance analysis of NB-IOT network for patients monitoring in rural areas. In *IREHI*.

### **Poster**

- Atchome, A. M., Tossa, F. U., Edoh, T. O., Ezin, E. C., Gouton, P., & Vianou, A. C. Heterogeneous Sensor Network System for patients monitoring in intensive care units. In *12th EAI International Conference on e-Infrastructure and e-Services for Developing Countries, Porto-Novo, Benin, Decembre 2019*.

### **Participations aux évènements scientifiques**

- Improving coverage area in sensor deployment using genetic algorithm. In *International Conference on Computational Science* (pp. 398-408). Springer, Cham.
- Performance Analysis of NB-IOT Network for Patients Monitoring in Rural Areas. In

International Rural and Elderly Health Informatics Conference (IREHI) 2018, Cotonou, Benin.

- Joint ICTP-IAEA School on LoRa Enabled Radiation and Environmental Monitoring Sensors. 23 avril - 11 mai 2018, ICTP, Trieste, Italy.
- A Multi-Tier Heterogeneous Sensor Network System for patients monitoring in intensive care units of different hospitals - The case of Cotonou in Benin. Conférence Internationale des Ministres de la Santé et des ministres des TIC sur la Sécurité et des Soins en Afrique (CIMSAs), 21 juin 2018, Cotonou.

- [1] Pavan Reddy M., Abhinav Kumar, and Kiran Kuchi. Design and performance analysis of joint control and shared channel scheduler for downlink in 3gpp narrowband-iot. *Ad Hoc Networks*, 114 :102440, 2021.
- [2] Ved P. Kaffe, Yusuke Fukushima, and Hiroaki Harai. Internet of things standardization in itu and prospective networking technologies. *IEEE Communications Magazine — Communications Standards Supplement*, pages 43–49, 2016.
- [3] Mathieu Le Guen Matthieu Kanj, Vincent Savaux. A tutorial on nb-iot physical layer design. *Communications Surveys and Tutorials, IEEE Communications Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2020.
- [4] Sami Mnasri. *Contributions to the optimized deployment of connected sensors on the Internet of Things collection networks*. Theses, Université Toulouse Jean Jaurès, June 2018.
- [5] Amulya Anurag Rahul Priyadarshi, Bharat Gupta. Deployment techniques in wireless sensor networks : a survey, classification, challenges, and future research issues. *The Journal of Supercomputing*, 01 2020.
- [6] Yong-hwan Kim, Chan-Myung Kim, Dong-Sun Yang, Young-jun Oh, and Youn-Hee Han. Regular sensor deployment patterns for p-coverage and q-connectivity in wireless sensor networks. In *The International Conference on Information Network 2012*, pages 290–295, 2012.
- [7] Pierre Fouilhoux. Méthodes heuristiques en optimisation combinatoire. <http://www-poleia.lip6.fr/~fouilhoux/documents/synthese-heuristique>.
- [8] Frantz Tossa, Wahabou Abdou, Eugène C. Ezin, and Pierre Gouton. Improving coverage area in sensor deployment using genetic algorithm. In Valeria V. Krzhizhanovskaya, Gábor Závodszy, Michael H. Lees, Jack J. Dongarra, Peter M. A. Sloot, Sérgio Brissos, and João Teixeira, editors, *Computational Science – ICCS 2020*, pages 398–408, Cham, 2020. Springer International Publishing.

- [9] Frantz Tossa, Wahabou Abdou, Keivan Ansari, Eugène C Ezin, and Pierre Gouton. Area coverage maximization under connectivity constraint in wireless sensor networks. *Sensors*, 22(5) :1712, 2022.
- [10] P. Suresh, J. V. Daniel, V. Parthasarathy, and R. H. Aswathy. A state of the art review on the internet of things (iot) history, technology and fields of deployment. *2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR)*, pages 1–8, 2014.
- [11] Manuel Díaz, Cristian Martín, and Bartolomé Rubio. State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of internet of things and cloud computing. *Journal of Network and Computer Applications*, 67 :99–117, 2016.
- [12] Vipul Gupta and David G. Simmons. Building the web of things with sun spots. *Building the Web of Things with Sun SPOTs, JavaOne 2010, Hands-on Lab*, 2010.
- [13] Abhishek Malik, Amrit Thapa Magar, Harsh Verma, Meeta Singh, and Pinki Sagar. A detailed study of an internet of things (iot). *Journal of Network and Computer Applications*, 67 :99–117, 2016.
- [14] ITU-T. Overview of the internet of things. *SERIES Y : GLOBAL INFORMATION INFRASTRUCTURE, INTERNET PROTOCOL ASPECTS AND NEXT-GENERATION NETWORKS*, 2012.
- [15] Hend Ben Hadji. Prida track 1 : Les fondamentaux de l’iot. *Prida Track 1 : Les fondamentaux de l’IoT*, 2020.
- [16] P.P. Ray. A survey on internet of things architectures. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 30(3) :291–319, 2018.
- [17] Angela M. Lonzetta, Peter Cope, Joseph Campbell, Bassam J. Mohd, and Thair Hayajneh. Security vulnerabilities in bluetooth technology as used in iot. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 7(3), 2018.
- [18] Hany Fathy Atlam, Robert Walters, and Gary Wills. Internet of things : state-of-the-art, challenges, applications, and open issues. *International Journal of Intelligent Computing Research (IJICR)*, 9(3) :928–938, 2018.
- [19] Radek Krejčí, Ondřej Hujňák, and Marek Švepeš. Security survey of the iot wireless protocols. In *2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR)*, pages 1–4, 2017.
- [20] Zengxu Yang and C Hwa Chang. 6lowpan overview and implementations. In *EWSN*, pages 357–361, 2019.
- [21] Ishaq Unwala, Zafar Taqvi, and Jiang Lu. Thread : An iot protocol. In *2018 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, pages 161–167, 2018.
- [22] Ishaq Unwala, Zafar Taqvi, and Jiang Lu. Iot security : Zwave and thread. In *2018 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, pages 176–182, 2018.
- [23] Zhao S. Li S., Xu L. D. The internet of things : a survey. *Information Systems Frontiers*, 17(2) :243–259, 2014.

- [24] Lalit Chettri and Rabindranath Bera. A comprehensive survey on internet of things (iot) toward 5g wireless systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(1) :16–32, 2020.
- [25] Chathura Withanage, Rahul Ashok, Chau Yuen, and Kevin Otto. A comparison of the popular home automation technologies. In *2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, pages 600–605, 2014.
- [26] Ievgeniia Kuzminykh, Arkadii Snihurov, and Anders Carlsson. Testing of communication range in zigbee technology. In *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, pages 133–136, 2017.
- [27] Phan minh Linh An and Taehong Kim. A study of the z-wave protocol : Implementing your own smart home gateway. In *2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, pages 411–415, 2018.
- [28] Stefan Marksteiner, Víctor Juan Exposito Jimenez, Heribert Valiant, and Herwig Zeiner. An overview of wireless iot protocol security in the smart home domain. In *2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks*, pages 1–8, 2017.
- [29] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand Meyer. Overview of cellular lpwan technologies for iot deployment : Sigfox, lorawan, and nb-iot. In *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pages 197–202, 2018.
- [30] Qahhar Muhammad Qadir, Tarik A. Rashid, Nawzad K. Al-Salihi, Birzo Ismael, Alexander A. Kist, and Zhongwei Zhang. Low power wide area networks : A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs. *IEEE Access*, 6 :77454–77473, 2018.
- [31] LoRa Alliance. Lorawan specification version 1.
- [32] Chun-Hao Liao, Guibing Zhu, Daiki Kuwabara, Makoto Suzuki, and Hiroyuki Morikawa. Multi-hop lora networks enabled by concurrent transmission. *IEEE Access*, 5 :21430–21446, 2017.
- [33] Ali Waqar Azim, Antoine Rullier, Yannis Le Guennec, Laurent Ros, and Ghislaine Maury. Energy efficient  $\updownarrow$ -ary frequency-shift keying-based modulation techniques for visible light communication. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 5(4) :1244–1256, 2019.
- [34] The Mobile Broadband Standard. About 3gpp. <https://www.3gpp.org/about-3gpp>, 2021.
- [35] Rapeepat Ratasuk, Nitin Mangalvedhe, David Bhatoolaul, and Amitava Ghosh. Lte-m evolution towards 5g massive mtc. In *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 1–6, 2017.

- [36] Andreas Høglund, G. A. Medina-Acosta, Sandeep Narayanan Kadan Veedu, Olof Liberg, Tuomas Tirronen, Emre A. Yavuz, and Johan Bergman. 3gpp release-16 pre-configured uplink resources for lte-m and nb-iot. *IEEE Communications Standards Magazine*, 4(2) :50–56, 2020.
- [37] Suresh R. Borkar. 7 - long-term evolution for machines (lte-m). In Bharat S. Chaudhari and Marco Zennaro, editors, *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, pages 145–166. Academic Press, 2020.
- [38] Saba Al-Rubaye, Jonathan Rodriguez, Luca Zanotti Fragonara, Paul Theron, and Antonios Tsourdos. C narrowband technologies for industrial internet of things services. *IEEE Network*, 33(4) :16–22, 2019.
- [39] Hassan Malik, Haris Pervaiz, Muhammad Mahtab Alam, Yannick Le Moullec, Alar Kuusik, and Muhammad Ali Imran. Radio resource management scheme in nb-iot systems. *IEEE Access*, 6 :15051–15064, 2018.
- [40] Atchome Athanase, Frantz Tossa, Thierry Oscar Dr Edoh, Wahabou Abdou, Marc K Assogba, Eugene Ezin, and Antoine C Vianou. Performance analysis of nb-iot network for patients monitoring in rural areas (irehi2018). *International Rural and Elderly Health Informatics Conference*, 2019.
- [41] Kingston Technology Laurent Sirgy. L’iot et ses applications dans le monde de demain. <https://www.journaldunet.com/ebusiness/internet-mobile/1506099-1-ido-et-ses-applications-dans-le-monde-de-demain/>, 2021.
- [42] Actutem. Prévisions d’intenses croissances pour le marché iot jusqu’en 2025. <https://www.actutem.com/previsions-dintenses-croissances-pour-le-marche-iot-jusquen-2025/>, 2019.
- [43] Chun Sing Lai, Youwei Jia, Zhekang Dong, Dongxiao Wang, Yingshan Tao, Qi Hong Lai, Richard T. K. Wong, Ahmed F. Zobaa, Ruiheng Wu, and Loi Lei Lai. A review of technical standards for smart cities. *Clean Technologies*, 2(3) :290–310, 2020.
- [44] Mahdi Fotouhi, Majid Bayat, Ashok Kumar Das, Hossein Abdi Nasib Far, S. Mor-teza Pournaghi, and M.A. Doostari. A lightweight and secure two-factor authentication scheme for wireless body area networks in health-care iot. *Computer Networks*, 177 :107333, 2020.
- [45] Vatsal Chauhan, Meetu Patel, Sudeep Tanwar, Sudhanshu Tyagi, and Neeraj Kumar. Iot enabled real-time urban transport management system. *Computers & Electrical Engineering*, 86 :106746, 2020.
- [46] Haralampos Gavriilidis, Adrian Michalke, Laura Mons, Steffen Zeuch, and Volker Markl. Scaling a public transport monitoring system to internet of things infra-structures. *EDBT*, pages 627–630, 2020.
- [47] Diego G.S. Pivoto, Luiz F.F. de Almeida, Rodrigo da Rosa Righi, Joel J.P.C. Rodrigues, Alexandre Baratella Lugli, and Antonio M. Alberti. Cyber-physical systems

- architectures for industrial internet of things applications in industry 4.0 : A literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 58 :176–192, 2021.
- [48] Mutualia. L’internet des objets (iot) pour une agriculture plus intelligente. <https://www.mutualia.fr/agriculteur/infos/economie-et-societe/news/internet-des-objets-iot-pour-une-agriculture-plus-intelligente>, 2021.
- [49] Pankaj Kumar Kashyap, Sushil Kumar, Ankita Jaiswal, Mukesh Prasad, and Amir H. Gandomi. Towards precision agriculture : Iot-enabled intelligent irrigation systems using deep learning neural network. *IEEE Sensors Journal*, 21(16) :17479–17491, 2021.
- [50] Aashma Uprety and Danda B. Rawat. Reinforcement learning for iot security : A comprehensive survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(11) :8693–8706, 2021.
- [51] Matthias Auf der Mauer, Tristan Behrens, Mahdi Derakhshanmanesh, Christopher Hansen, and Stefan Muderack. *Applying Sound-Based Analysis at Porsche Production : Towards Predictive Maintenance of Production Machines Using Deep Learning and Internet-of-Things Technology*, pages 79–97. Springer International Publishing, Cham, 2019.
- [52] Rihem Larbi. Déploiement optimal des nœuds de capteurs employant le clustering k-means et un algorithme génétique. Master’s thesis, École de technologie supérieure, 2021.
- [53] Mengyi Zhang. *Optimisation de la couverture de communication et de mesure dans les réseaux de capteurs*. PhD thesis, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2015.
- [54] Cheick-Tidjane Kone. *Conception de l’architecture d’un réseau de capteurs sans fil de grande dimension*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2011.
- [55] Amulya Anurag Rahul Priyadarshi, Bharat Gupta. Wireless sensor networks deployment : A result oriented analysis. *Wireless Personal Communications*, 113, 01 2020.
- [56] Sangwan Anju and Singh Rishi Pal. Survey on coverage problems in wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, 80(4) :1475–1500, Feb 2015.
- [57] Aznoli Fariba and Navimipour Nima Jafari. Deployment strategies in the wireless sensor networks : Systematic literature review, classification, and current trends. *Wireless Personal Communications*, 95(2) :819–846, Jul 2017.
- [58] Gayarti Devi and Rajeeb Sankar Bal. Node deployment coverage in large wireless sensor networks. *Journal of Network Communications and Emerging Technologies (JNCET)*, 6, Feb 2016.
- [59] Benatia Mohamed Amin, Sahnoun M’hammed, Baudry David, Anne Louis, Abdelkhalak El-Hami, and Mazari Belahcene. Multi-objective wsn deployment using genetic algorithms under cost, coverage, and connectivity constraints. *Wireless Personal Communications*, 94 :2739 – 2768, 2017.

- [60] Ines Khoufi, Pascale Minet, Anis Laouiti, and Saoucene Mahfoudh. Survey of Deployment Algorithms in Wireless Sensor Networks : Coverage and Connectivity Issues and Challenges. *International journal of autonomous and adaptive communications systems*, 10(4) :341–390, 2017.
- [61] Y. Yoon and Y. Kim. An efficient genetic algorithm for maximum coverage deployment in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 43(5) :1473–1483, Oct 2013.
- [62] O. Zorlu and O. K. Sahingoz. Increasing the coverage of homogeneous wireless sensor network by genetic algorithm based deployment. In *2016 Sixth International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP)*, pages 109–114, July 2016.
- [63] Nguyen Thi Hanh, Huynh Thi Thanh Binh, Nguyen Xuan Hoai, and Marimuthu Swami Palaniswami. An efficient genetic algorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks. *Information Sciences*, 488 :58 – 75, 2019.
- [64] S. Mnasri, A. Thaljaoui, N. Nasri, and T. Val. A genetic algorithm-based approach to optimize the coverage and the localization in the wireless audio-sensors networks. In *2015 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, pages 1–6, May 2015.
- [65] ZainEldin Hanaa, Badawy Mahmoud, Elhosseini Mostafa, Arafat Hesham, and Abraham Ajith. An improved dynamic deployment technique based-on genetic algorithm (iddt-ga) for maximizing coverage in wireless sensor networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, January 2020.
- [66] Ly Dinh Thi Ha, Nguyen Thi Binh, Huynh Thi Thanh Nghia, and Nguyen Duc. An improved genetic algorithm for maximizing area coverage in wireless sensor networks. In *Proceedings of the Sixth International Symposium on Information and Communication Technology, SoICT 2015*, page 61–66, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [67] Harizan Subash and Kuila Pratyay. Coverage and connectivity aware energy efficient scheduling in target based wireless sensor networks : an improved genetic algorithm based approach. *Wireless Networks*, 15 :1995–2011, 2019.
- [68] Suneet Kumar Gupta, Pratyay Kuila, and Prasanta K. Jana. Genetic algorithm approach for k-coverage and m-connected node placement in target based wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 56 :544 – 556, 2016.
- [69] Arouna Ndam Njoya, Ado Adamou Abba Ari, Marah Nana Awa, Chafiq Titouna, Nabila Labraoui, Joseph Yves Effa, Wahabou Abdou, and Abdelhak Gueroui. Hybrid wireless sensors deployment scheme with connectivity and coverage maintaining in wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, 56 :544 – 556, 2020.
- [70] Khalid Haseeb, Ikram Ud Din, A.s Al-Mogren, and Naveed Islam. An energy efficient

- and secure iot-based wsn framework : An application to smart agriculture. *Sensors*, 20, 04 2020.
- [71] Hitesh Mohapatra and Amiya Kumar Rath. Survey on fault tolerance-based clustering evolution in wsn. *IET networks*, 9(4) :145–155, 2020.
- [72] Nagar Jaiprakash Amutha J, Sharma Sandeep. Wsn strategies based on sensors, deployment, sensing models, coverage and energy efficiency : Review, approaches and open issues. *Wireless Personal Communications*, 03 2020.
- [73] A. N. Njoya, W. Abdou, A. Dipanda, and E. Tonye. Evolutionary-based wireless sensor deployment for target coverage. In *2015 11th International Conference on Signal-Image Technology Internet-Based Systems (SITIS)*, pages 739–745, Nov 2015.
- [74] M. Farsi, M. A. Elhosseini, M. Badawy, H. Arafat Ali, and H. Zain Eldin. Deployment techniques in wireless sensor networks, coverage and connectivity : A survey. *IEEE Access*, 7 :28940–28954, 2019.
- [75] Xuan Yang, Guangjie Han, Li Liu, Aihua Qian, and Wenbo Zhang. Igrc : An improved grid-based joint routing and charging algorithm for wireless rechargeable sensor networks. *Future Generation Computer Systems*, 92 :837–845, 2019.
- [76] Yanheng Liu, Longxiang Suo, Dayang Sun, and Aimin Wang. A virtual square grid-based coverage algorithm of redundant node for wireless sensor network. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(2) :811–817, 2013.
- [77] Xiaohua Deng, Zhiyong Yu, Rongxin Tang, Xin Qian, Kai Yuan, and Shiyun Liu. An optimized node deployment solution based on a virtual spring force algorithm for wireless sensor network applications. *Sensors*, 19(8), 2019.
- [78] EURODECISION ALGORITHMS FOR BUSINESS. Algorithmes : Heuristiques et méta-heuristiques. <https://www.eurodecision.com/algorithmes/recherche-operationnelle-optimisation/heuristiques-meta-heuristiques>.
- [79] K. Vijayalakshmi and P. Anandan. A multi objective tabu particle swarm optimization for effective cluster head selection in wsn. *Cluster Computing*, 2019.
- [80] Larry J. Eshelman and J. David Schaffer. Real-coded genetic algorithms and interval-schemata. In L. DARRELL WHITLEY, editor, *Foundations of Genetic Algorithms*, volume 2 of *Foundations of Genetic Algorithms*, pages 187 – 202. Elsevier, 1993.
- [81] Pal Varga, Jozsef Peto, Attila Franko, David Balla, David Haja, Ferenc Janky, Gabor Soos, Daniel Ficzer, Markosz Maliosz, and Laszlo Toka. 5g support for industrial iot applications— challenges, solutions, and research gaps. *Sensors*, 20(3), 2020.
- [82] Bushra Rashid and Mubashir Husain Rehmani. Applications of wireless sensor networks for urban areas : A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 60 :192 – 219, 2016.

- [83] Bang Wang. Coverage problems in sensor networks : A survey. *ACM Comput. Surv.*, 43(4), oct 2011.
- [84] Gerald L. Orick, Kenneth Stephenson, and Charles Collins. A linearized circle packing algorithm. *Computational Geometry*, 64 :13 – 29, 2017.
- [85] Litvinchev I., Infante L., and Ozuna L. Packing circular-like objects in a rectangular container. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 54(2) :259–267, Mar 2015.
- [86] Sharon L Padula and Rex K. Kinkaid. Optimization strategies for sensor and actuator placement. *Nasa Langley Research Center*, 1999.
- [87] Charles Darwin. *On the origin of species, 1859*. Routledge, 2004.
- [88] Holland John. Holland. genetic algorithms. *Scientific american*, 267(1) :44–50, 1992.
- [89] R Duvigneau. Introduction aux méthodes d’optimisation sans gradient pour l’optimisation et le contrôle en mécanique des fluides. *Ecole de printemps OCET Optimisation et Contrôle des Écoulements et des Transferts*, pages 12–17, 2006.
- [90] John H. Holland. Adaptation in natural and artificial systems. *University of Michigan Press*, 1975.
- [91] Khalid Jebari. Selection methods for genetic algorithms. *International Journal of Emerging Sciences*, 3 :333–344, 12 2013.
- [92] Sourabh Katoch, Sumit Singh Chauhan, and Vijay Kumar. A review on genetic algorithm : past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 80 :8091–8126, 2021.
- [93] Anne Brindle. *Genetic algorithms for function optimization*. PhD thesis, University of Alberta, August 1980.
- [94] Zhan Li, Jie Huang, and Ming Ding. Comparison and analysis of different selection strategies of genetic algorithms for fuel reloading optimization of thorium-based htgrs. *Nuclear Engineering and Design*, 373 :110969, 2021.
- [95] Walaa H El-Ashmawi, Ahmed F Ali, and Adam Slowik. Hybrid crow search and uniform crossover algorithm-based clustering for top-n recommendation system. *Neural Computing and Applications*, 33(12) :7145–7164, 2021.
- [96] Ines Ayadi, Laurent Bouillaut, Patrice Aknin, and Patrick Siarry. Optimisation par algorithme génétique de la maintenance préventive dans un contexte de modélisation par modèles graphiques probabilistes. In *Lambda Mu 17, 17ème Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement*, page 10p, 2010.
- [97] Page web. Mutation (algorithme génétique). [https://stringfixer.com/fr/Mutation\\_\(genetic\\_algorithm\)](https://stringfixer.com/fr/Mutation_(genetic_algorithm)). Récupéré le 19/05/22.
- [98] Yourim Yoon and Yong-Hyuk Kim. *The roles of crossover and mutation in real-coded genetic algorithms*. Citeseer, 2012.

- [99] Wen-Hwa Liao, Yucheng Kao, and Ying-Shan Li. A sensor deployment approach using glowworm swarm optimization algorithm in wireless sensor networks. *Expert Systems with Applications*, 38(10) :12180–12188, 2011.
- [100] Vahid Khalilpour Akram, Zuleyha Akusta Dagdeviren, Orhan Dagdeviren, and Moharram Challenger. Pinc : Pickup non-critical node based k-connectivity restoration in wireless sensor networks. *Sensors*, 21(19), 2021.
- [101] Zuleyha Akusta Dagdeviren and Vahid Akram. *Connectivity Estimation Approaches for Internet of Things-Enabled Wireless Sensor Networks*, chapter 6, pages 104–122. edited by Pelin Yildirim Taser, IGI Global, 2022.
- [102] Mohsen Sheikh-Hosseini and Seyed Rouhollah Samareh Hashemi. Connectivity and coverage constrained wireless sensor nodes deployment using steepest descent and genetic algorithms. *Expert Systems with Applications*, 190 :116164, 2022.
- [103] Michael Ratcliffe, Charlynn Burd, Kelly Holder, and Alison Fields. Defining rural at the us census bureau. *American community survey and geography brief*, 1(8) :1–8, 2016.
- [104] Ali Arif, Muhammad Zubair, Mubasher Ali, Muhammad Umar Khan, and Muhammad Qasim Mehmood. A compact, low-profile fractal antenna for wearable on-body wban applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(5) :981–985, 2019.
- [105] Nkqubela L Ruxwana, Marlien E Herselman, and D Pieter Conradie. Ict applications as e-health solutions in rural healthcare in the eastern cape province of south africa. *Health Information Management Journal*, 39(1) :17–29, 2010. PMID : 20335646.
- [106] Alexandros-Apostolos A Boulogeorgos, Panagiotis D Diamantoulakis, and George K Karagiannidis. Low power wide area networks (lpwans) for internet of things (iot) applications : Research challenges and future trends. *arXiv preprint arXiv :1611.07449*, 2016.
- [107] Rapeepat Ratasuk, Benny Vejlgaard, Nitin Mangalvedhe, and Amitava Ghosh. Nb-iot system for m2m communication. In *2016 IEEE wireless communications and networking conference*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [108] Hassan Malik, Muhammad Mahtab Alam, Yannick Le Moullec, and Alar Kuusik. Narrowband-iot performance analysis for healthcare applications. *Procedia Computer Science*, 130 :1077–1083, 2018. The 9th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2018) / The 8th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2018) / Affiliated Workshops.
- [109] Samuela Persia and Luca Rea. Next generation m2m cellular networks : Lte-mtc and nb-iot capacity analysis for smart grids applications. In *2016 AEIT international annual conference (AEIT)*, pages 1–6. IEEE, 2016.

- [110] Hitesh Mohapatra and Amiya Kumar Rath. Survey on fault tolerance-based clustering evolution in wsn. *IET networks*, 9(4) :145–155, 2020.
- [111] Lilia Paradis and Qi Han. A survey of fault management in wireless sensor networks. *Journal of Network and systems management*, 15(2) :171–190, 2007.
- [112] Lin Deyu, Wang Quan, Min Weidong, Xu Jianfeng, and Zhang Zhiqiang. A survey on energy-efficient strategies in static wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 02 2021.
- [113] Adnan Alrabea, Omar A Alzubi, and Jafar A Alzubi. A task-based model for minimizing energy consumption in wsns. *Energy Systems*, pages 1–18, 2019.
- [114] Damien Wohwe Sambo, Blaise Omer Yenke, Anna Förster, and Paul Dayang. Optimized clustering algorithms for large wireless sensor networks : A review. *Sensors*, 19(2) :322, 2019.