



**HAL**  
open science

# Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau

Diery Ngom

► **To cite this version:**

Diery Ngom. Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Haute Alsace - Mulhouse; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2016. Français. NNT : 2016MULH9134 . tel-01531464

**HAL Id: tel-01531464**

**<https://theses.hal.science/tel-01531464>**

Submitted on 1 Jun 2017

**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.

Numéro d'ordre : .....

UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE



Ecole Doctorale Mathématiques, Sciences  
de l'Information et de l'Ingénieur  
Laboratoire Modélisation, Intelligence, Processus et Systèmes

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Ecole Doctorale Mathématique-Informatique  
Laboratoire d'Informatique

---

---

## Thèse de Doctorat

En vue de l'obtention du grade de **Docteur** de l'Université de Haute Alsace (France) et de  
l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal)

**Spécialité** : Informatique

---

---

Soutenue le 17 Mai 2016 par **Diery NGOM**

## Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité

---

---

### Jury

Hervé GUYENNET	Professeur, Université Franche-Comté, France	Rapporteur
Jose-Neuman DE SOUZA	Professeur, Université Fédérale Ceara, Brésil	Rapporteur
Zoubir MAMMERRI	Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse, France	Examineur
Cheikh A. Bamba GUEYE	Professeur, Université Cheikh Anta Diop, Sénégal	Co-directeur
Pascal LORENZ	Professeur, Université de Haute Alsace, France	Co-directeur

# Table des matières

Remerciements.....	7
Résumé.....	9
Abstract.....	11
<b>Introduction générale .....</b>	<b>12</b>
1. Contexte.....	12
2. Objectifs de recherche.....	14
3. Contributions.....	15
4. Organisation du manuscrit de thèse .....	15
<b>Chapitre 1 : Etat de l'art sur les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) .....</b>	<b>16</b>
1.1 Introduction.....	16
1.2 Fonctionnement des RCSF.....	16
1.3 Structure d'un nœud capteur sans fil.....	17
1.3.1 Unité d'acquisition.....	17
1.3.2 Unité de traitement (processeur).....	18
1.3.3 Unité de communication.....	18
1.3.4 Batterie.....	18
1.4 Domaines d'applications des RCSF.....	19
1.4.1 Applications militaires.....	19
1.4.2 Applications de surveillance.....	19
1.4.3 Applications environnementales.....	20
1.4.4 Applications médicales.....	20
1.4.5 Applications commerciales.....	21
1.4.6 Applications domotiques .....	21
1.4.7 Applications agricoles .....	22
1.5 Architecture des RCSF.....	23
1.5.1 Architecture à plat.....	23
1.5.2 Architecture hiérarchique .....	24
1.6 Modèles de communication dans les RCSF.....	25
1.6.1 Modèle en couche .....	25
1.6.1.1 La couche physique.....	26
1.6.1.2 La couche liaison de donnée .....	26
1.6.1.3 La couche réseau.....	27
1.6.1.4 La couche transport.....	27

1.6.1.5 La couche application .....	27
1.6.1.6 La couche de gestion de l'énergie .....	27
1.6.1.7 La couche de gestion de la mobilité .....	28
1.6.1.8 La couche de gestion des tâches .....	28
1.6.2 Piles de communication pour capteurs .....	28
1.6.2.1 La norme IEEE 802.15.4 .....	28
1.6.2.2 ZigBee .....	29
1.6.3 Systèmes d'exploitation pour capteurs .....	31
1.6.3.1 TinyOS .....	31
1.6.3.2 Contiki et Rime .....	32
1.6.3.3 MANTIS OS .....	33
1.6.3.4 SOS .....	33
1.7 Conclusion .....	33
<b>Chapitre 2 : Techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture et de connectivité .....</b>	<b>35</b>
2.1 Introduction .....	35
2.2 Facteurs et contraintes influents sur la conception et le déploiement de RCSF .....	35
2.2.1 Durée de vie du réseau .....	35
2.2.2 Ressources limitées .....	36
2.2.3 Facteur d'échelle .....	36
2.2.4 Topologie dynamique .....	37
2.2.5 Agrégation des données .....	37
2.2.6 Etat du module radio .....	37
2.2.7 Méthodes d'accès au support .....	38
2.2.7.1 L'écoute active du canal .....	38
2.2.7.2 La sur-écoute du canal .....	39
2.2.7.3 La taille des paquets .....	39
2.2.7.4 La surémission .....	39
2.3 Méthodes de placement des nœuds capteurs dans les RCSF .....	39
2.3.1 Placement aléatoire .....	40
2.3.2 Placement déterministe .....	40
2.4 Couverture dans les RCSF .....	40
2.4.1 Définition de la couverture dans les RCSF .....	40
2.4.2 Types de couvertures dans les RCSF .....	41
2.5 Connectivité dans les RCSF .....	43

2.5.1 Définition de la connectivité dans les RCSF .....	43
2.5.2 Types de connectivité dans les RCSF.....	44
2.6 Routage dans les RCSF.....	44
2.6.1 Protocoles de routage à plat.....	46
2.6.1.1 SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation) .....	46
2.6.1.2 DD (Directed Diffusion) .....	46
2.6.1.3 RR (Rumour Routing).....	47
2.6.1.4 Cougar.....	47
2.6.2 Protocoles de routage hiérarchique.....	47
2.6.2.1 LEACH (Low-Energy Adaptive ClusteringHierarchy) .....	47
2.6.2.2 PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems).....	48
2.6.2.3 TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) .....	49
2.6.2.4 APTEEN (Adaptive TEEN) .....	50
2.6.2.5 HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering).....	50
2.6.2.6 SAR (Sensor Aggregates Routing) .....	51
2.6.3 Comparaison des protocoles de routage de RCSF.....	51
2.7 Techniques de conservation énergétique dans les RCSF .....	53
2.7.1 L'énergie de capture .....	53
2.7.2 L'énergie de traitement.....	53
2.7.3 L'énergie de communication .....	53
2.8 Classification des techniques de conservation énergétique .....	54
2.8.1 Protocoles MAC basés sur le "duty cycle".....	54
2.8.2 Protocoles MAC basés sur TDMA .....	55
2.8.3 Protocoles MAC hybrides.....	55
2.8.4 Techniques de réduction de données .....	55
2.8.5 Comparaison des techniques de conservation énergétique.....	56
2.9 Techniques orientées « placement des nœuds, couverture et/ou connectivité » .....	56
2.9.1 Techniques de placement des nœuds basées sur des calculs géométriques.....	57
2.9.2 Techniques de placement des nœuds basées sur des grilles .....	57
2.10 Techniques orientées « optimisation multi-objectif sous contraintes » .....	58
2.11 Protocoles MAC basés sur le duty cycle.....	61
2.11.1 S-MAC et T-MAC.....	61
2.11.2 B-MAC et X-MAC .....	62
2.11.3 Z-MAC .....	62

2.11.4 TunableMAC .....	63
2.11.5 Comparaison des protocoles MAC basés sur le duty cycle .....	64
2.12 Synthèse des techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture et connectivité .....	64
2.13 Problématiques des techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture et connectivité.....	65
2.13.1 Problématiques des techniques orientées « placement des nœuds, couverture et/ou connectivité ».....	65
2.13.2 Problématiques des techniques orientées « optimisation multi-objectif sous contraintes» .....	66
2.13.3 Problématiques des protocoles MAC basés sur le duty cycle .....	66
2.14 Conclusion .....	67

**Chapitre 3 : Propositions de nouvelles stratégies pour l'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture et de connectivité ..... 68**

3.1 Introduction.....	68
3.2 Modélisation des composants et des paramètres du RCSF.....	68
3.2.1 Modèle de réseau .....	68
3.2.2 Modèles du canal de communication .....	70
3.2.2.1 Le modèle du disque unitaire .....	71
3.2.2.2 Le modèle log-normal.....	72
3.2.3 Modèle de détection des phénomènes physiques .....	74
3.2.4 Modélisation de la couverture dans les RCSF.....	74
3.2.4.1 Couverture de points dans les RCSF.....	75
3.2.4.2 Couverture de surface dans les RCSF.....	75
3.2.4.3 Couverture de région dans les RCSF .....	75
3.2.5 Modélisation de la connectivité du RCSF .....	76
3.2.6 Modèle de consommation énergétique .....	77
3.3 Proposition d'une nouvelle méthode de placement géométrique des nœuds.....	79
3.4 Présentation de l'algorithme DSMAC .....	82
3.4.1 Description de DSMAC.....	82
3.4.2 Illustration de l'algorithme DSMAC sous forme de pseudo-code .....	83
3.4.3 Mécanisme de sleep/wake-up dans TunableMAC .....	84
3.4.4 Mécanisme de sleep/wake-up mis en œuvre pour DSMAC.....	84
3.4.5 Principaux avantages de DSMAC .....	85
3.5 Evaluations analytiques de DSMAC.....	86
3.5.1 Etude de la complexité de DSMAC.....	86

3.5.1.1 Outils formels pour l'évaluation de la complexité algorithmique .....	86
3.5.1.2 Calcul de la complexité algorithmique de DSMAC .....	90
3.5.2 Etude analytique de la couverture et de la connectivité dans DSMAC .....	92
3.5.2.1 Théorème d'existence d'une couverture totale de la zone d'intérêt selon DSMAC ..	93
3.5.2.2 Théorème d'existence d'une connectivité optimale du RCSF selon DSMAC .....	97
3.6 Conclusion .....	99
<b>Chapitre 4 : Evaluation de DSMAC.....</b>	<b>100</b>
4.1 Introduction.....	100
4.2 Description et calcul des paramètres de simulation .....	101
4.2.1 Calcul des rayons de communication, de détection et de la longueur de la grille .....	101
4.2.2 Paramètres de simulation.....	103
4.3 Métriques d'évaluation des performances dans DSMAC .....	105
4.4 Evaluation des performances de DSMAC .....	105
4.4.1 Evaluation de la consommation énergétique dans DSMAC.....	105
4.4.2 Evaluation du nombre de paquets reçus par la station de base dans DSMAC .....	107
4.4.4 Evaluation du niveau de latence des paquets dans DSMAC .....	107
4.5 Conclusion .....	108
<b>Chapitre 5 : Conclusion et perspectives .....</b>	<b>109</b>
5.1 Synthèse .....	109
5.2 Contributions.....	109
5.3 Perspectives.....	110
Liste des figures .....	112
Liste des tableaux.....	113
Abbréviation.....	114
Publications.....	117
Annexe .....	118
<b>Bibliographie .....</b>	<b>122</b>

## Remerciements

Je remercie d'abord le Bon DIEU de m'avoir donné la santé, la force et l'ambition de pouvoir faire cette thèse.

Je tiens à remercier sincèrement et en premier lieu mes deux co-directeurs de thèse qui ont accepté de diriger mes travaux de thèse et m'ont donné un encadrement de qualité tout au long de cette thèse. Il s'agit du Pr. Pascal LORENZ, professeur en Réseaux et Télécommunications à l'Université de Haute Alsace (France) et du Pr. Cheikh Ahmadou Bamba GUEYE, professeur en Informatique au département de Mathématique-Informatique de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal). Grâce à leurs sympathies, leurs disponibilités, leurs idées, leurs conseils et leurs encouragements, j'ai pu bien mener mes travaux de recherches et pouvoir rédiger ce rapport de thèse.

Je remercie également tous les membres du jury de cette thèse, les rapporteurs et examinateurs qui ont accepté d'évaluer mes travaux de thèse. Je remercie en ce sens respectivement, Pr. Hervé GUYENNET, professeur à l'UFR Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté, Besançon (France), Pr. Jose-Neuman DE SOUZA, professeur à l'Université Fédérale Ceara (Brésil) et Pr. Zoubir MAMMERI, professeur à l'IRIT de l'Université Paul Sabatier de Toulouse (France).

Cette thèse a été préparée dans le cadre d'une cotutelle entre le laboratoire d'Informatique de l'Ecole doctorale Mathématique-Informatique de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD), Sénégal et le Groupe de Recherche en Réseaux et Télécommunication de Colmar (GRTC), unité du laboratoire Modélisation, Intelligence, Processus et Système (MIPS) de l'Ecole doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'ingénieur de l'Université de Haute Alsace (UHA), France. Je tiens donc à remercier les directeurs de ces deux laboratoires et plus particulièrement Pr. Olivier HAEBERLE, directeur du laboratoire MIPS, de m'avoir accueilli et donné l'opportunité de réaliser mes travaux de thèse dans ce laboratoire d'accueil. J'adresse également mes remerciements respectivement au directeur l'école doctorale de Mathématique-Informatique de l'UCAD, Pr. Hamidou DATHE et au directeur de l'école doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'ingénieur de l'UHA, Pr. Marie-Helene TUILER.

Je remercie aussi M. Abdelhafid ABOUAISSA, Maître de conférences à l'UHA pour ses conseils



qui m'ont également permis de bien mener mes travaux de thèse durant mes séjours de recherches à l'UHA.

Un grand merci à tous les membres de l'équipe GRTC de l'UHA qui m'ont offert un excellent cadre de travail durant tous mes séjours de recherche à l'UHA. Je remercie en ce sens Dr. Abdusy SIARIF, Dr. Harris SIMAREMARE, M. Taleb HAFNAOUI, Mme Christiane LEGOFF.

Je ne saurai terminer sans remercier tous les membres de ma famille pour leurs soutiens et encouragements. Ainsi, je remercie sincèrement mon père Ndiamé NGOM, ma mère Awa NGOM, mon épouse Guignane DIOUF, ma grande sœur Mame Diara NGOM ainsi que tous les autres membres de ma famille, mes amis et mes proches.

*A ma famille,  
A ma petite fille, Maman Awa NGOM*

## Résumé

Depuis ces deux dernières décennies, une nouvelle technologie sans fil appelée Réseau de Capteur Sans Fil (RCSF) résultant d'une fusion entre les systèmes embarqués et les communications sans fil a vu le jour. Un RCSF ("WSN : Wireless Sensor Network" en Anglais) est un réseau Ad hoc composé d'un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs qui peuvent être déployés de façon aléatoire ou déterministe dans une zone d'intérêt donnée. Ces nœuds capteurs sont capables de récolter plusieurs paramètres physiques sur l'environnement qui les entoure, appelé généralement zone de captage (ou zone de surveillance). Ensuite, ils doivent si nécessaire traiter les données capturées et les transmettre à un (ou plusieurs) nœud de collecte appelé station de base, centre de traitement ("sink" en Anglais). Beaucoup de domaines d'applications tels que le contrôle et suivi environnemental, le contrôle de production dans l'industrie, la surveillance de zone, le monitoring de l'habitat, l'agriculture intelligente, etc. sont basés sur les RCSF.

Toutefois, les RCSF ne sont pas parfaits. En effet, compte tenu de leur petite taille, leur faible coût et leurs déploiement dans des zones souvent hostiles ou difficiles d'accès, les nœuds capteurs présentent un certain nombre de faiblesses parmi lesquelles une durée de vie du réseau limitée, une bande passante faible, des capacités de capture et de communication réduites, etc. Afin de surmonter ces contraintes des RCSF, plusieurs problématiques de recherche sont nées ces dernières années, et les principales portent sur l'optimisation de la consommation énergétique en vue d'améliorer la durée de vie du réseau. D'autres recherches importantes menées dans le domaine de ces réseaux portent sur les stratégies de placement des nœuds, sur la couverture de zones et sur la connectivité du réseau. Cependant, la plupart des solutions proposées ces dernières années ne prennent pas en compte toutes ces problématiques dans leurs modèles de résolution ; alors que dans beaucoup d'applications des RCSF telles que la surveillance de zone critique, le monitoring de l'habitat, l'agriculture intelligente, il est nécessaire de garantir en même temps une couverture complète de la zone de surveillance, une bonne connectivité du réseau, tout en optimisant au mieux la durée de vie de celui-ci.

Le but de cette thèse est donc de proposer de nouveaux mécanismes efficaces pour l'optimisation de la durée de vie dans les RCSF, tout en garantissant, à tout moment de cette durée de vie, une couverture totale de la zone de surveillance, ainsi qu'une bonne connectivité du réseau.

Pour atteindre nos objectifs, nous avons étudié et fait des propositions dans deux axes qui sont le

placement des nœuds et les mécanismes d'ordonnement au niveau de la couche MAC. Pour ces derniers, nous avons mis en place un algorithme appelé DSMAC (Distributed Scheduling Medium Acces Control) qui est basé sur notre méthode de placement des nœuds. Par ailleurs, DSMAC permet de couvrir 100% de la zone de surveillance, assure une bonne connectivité du RCSF et permet également aux nœuds capteurs d'économiser jusqu'à 30% de leur énergie comparativement à d'autres protocoles MAC tels que TunableMAC.

**Mots clés :** Réseaux de capteurs sans fil, durée de vie du réseau, couverture, connectivité

## Abstract

Since the past two decades, a new technology called Wireless Sensor Network (WSN) which result in a fusion of embedded systems and wireless communications has emerged. A WSN is Ad hoc network composed of many sensors nodes communicating via wireless links and which can be deployed randomly or deterministically over a given interest region. These sensors can also collect data from the environment, do local processing and transmit the data to a sink node or Base Station (BS) via multipath routing. Thereby, a wide range of potential applications have been envisioned using WSN such as environmental conditions monitoring, wildlife habitat monitoring, industrial diagnostic, agricultural, improve health care, etc.

Nevertheless, WSN are not perfect. Indeed, given their small size, their low cost and their deployment generally in hostile or difficult access areas, sensor nodes have some weaknesses such as: a limited energy, so a network lifetime limited, limited bandwidth, limited computations and communications capabilities, etc. To overcome these limitations, several research issues from were created in recent years, and the main issues focus on the optimization of energy consumption in order to improve the network lifetime. Other important researches focus on issues of coverage areas, placement strategies of sensor nodes and network connectivity. However, most solutions proposed in recent years to resolve these issues do not take into account all these issues that we cited above in resolutions models; while in many WSN applications such as monitoring critical region, wildlife habitat monitoring, agricultural application, a full coverage of the monitoring region and network connectivity are mandatory as well an energy-awareness network lifetime.

The objective of this thesis is thus to propose new scheduling mechanisms for optimizing the network lifetime in WSN, while ensuring at any time of the network lifetime a full coverage of the monitored region and network connectivity. To achieve our goals, we have study and done proposal in two axes which are placement strategy of sensor nodes and scheduling mechanism in the MAC layer.

For these, we have implemented a Distributed Scheduling Medium Access Control algorithm (DSMAC) based on our placement method. Furthermore, DSMAC enables to cover 100% of the monitored region, to ensure optimal network connectivity and also allows sensors node to save up to 30% of their energy compared to other MAC protocols such as TunableMAC.

**Key words:** Wireless sensor networks, network lifetime, coverage, connectivity

# Introduction générale

## 1. Contexte

Depuis leur création, les réseaux sans fil ne cessent de connaître un succès croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Grâce à leurs divers avantages, cette technologie a pu s'instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux de communication actuels. En effet, grâce à leur support de transmission qui est le média hertzien, ces réseaux présentent plusieurs avantages qui sont entre autres le coût réduit des équipements, la facilité d'installation et l'ubiquité de l'information. Au cours de leurs évolutions, les réseaux sans fil ont donné naissance à diverses architectures telles que les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fil, les réseaux Ad hoc, etc.

Durant ces deux dernières décennies, une nouvelle architecture appelée Réseau de Capteur Sans Fil (RCSF) a vu le jour. Ce type de réseau est né de la fusion entre les systèmes embarqués et les communications sans fil. Un RCSF ("WSN : Wireless Sensor Network" en Anglais) est un réseau Ad hoc composé d'un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs communicant via des liaisons sans fil par des ondes radioélectriques de façon autonome. Ces nœuds encore appelés capteurs sont capables de récolter plusieurs paramètres sur l'environnement qui les entoure, appelé généralement zone de captage (ou zone de surveillance). Ensuite, ils doivent si nécessaire traiter les données capturées et les transmettre à un ou plusieurs nœuds de collecte appelés station de base, collecteurs, centres de traitements (ou "sink" en Anglais). Dans la suite, nous utilisons les termes station de base afin de désigner les nœuds collecteurs.

La disposition des nœuds dans la zone de surveillance n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ainsi, ils peuvent être dispersés aléatoirement dans la zone de surveillance ou être placés de façon déterministe. Dans le cas des situations où on a une connaissance préalable de la zone de surveillance, les nœuds peuvent être placés de façon déterministe. Tandis que dans d'autres cas, en raison surtout de la grande taille du réseau ou de l'inaccessibilité de la zone de surveillance, le recours à un placement aléatoire est la seule alternative. De ce fait, on peut dire que le choix dépend fortement du type de nœuds capteurs (multimédia, acoustique, température, etc.), du type d'application et du type d'environnement (parking, terre agricole, zone montagneuse, mer, champ

de bataille, etc.) où sont déployés les nœuds. Par exemple, dans les applications de contrôle (domotique, maintenance préventive, automatisation industrielle), les applications multimédias, les applications de surveillance corporelle (santé, suivi d'animaux, etc.), l'agriculture intelligente, un déploiement déterministe est préférable parce que non seulement, on peut avoir une connaissance préalable du terrain, mais également les paramètres physiques ou physiologiques capturés par les nœuds capteurs doivent être précis, pertinents et de bonne qualité. Cela impose donc un emplacement approprié des nœuds capteurs. Il en est de même pour le placement des stations de base afin de pouvoir assurer l'acquisition, l'intégrité et le traitement de mesures capturées. En outre, les stratégies de placement et de déploiement des nœuds capteurs dans la zone de surveillance peuvent différer en fonction des applications et des objectifs à optimiser tels que la maximisation de la couverture de la zone de surveillance, la garantie d'une bonne connectivité dans le RCSF, la maximisation la durée de vie du réseau, etc.

Les RCSF étant souvent considérés comme des réseaux MANET (Mobile Ad hoc Network), ils partagent avec ces derniers un certain nombre de propriétés en commun, qui sont entre autres l'absence d'infrastructure et les communications sans fil. Cependant, les différences majeures entre ces types de réseaux restent leurs domaines d'applications et leurs problématiques. En effet, les RCSF ont le plus souvent des contraintes énergétiques, des contraintes de couverture, de connectivité, alors que les MANET ont généralement des contraintes de sécurité, de qualité de service ("QoS : Quality of Service" en Anglais), comme par exemple une latence faible, etc.

Contrairement aux réseaux MANET, les RCSF ont su attirer un nombre croissant d'industriels grâce surtout à leur succès et leur apport concret dans beaucoup de domaines de la vie actuelle. En effet, beaucoup d'applications basées sur les RCSF sont de plus en plus utilisées de nos jours. Nous pouvons citer les applications de contrôle et de suivi environnemental, celles de contrôle de production et de composants machines défectueux dans l'industrie, les applications de surveillance de zone (surveillance de parking, surveillance de feux de forêts, etc.), les applications intelligentes pour le monitoring de l'habitat, l'agriculture intelligente, les applications médicales (par exemple la surveillance corporelle), les applications militaires de traçage et de détections (détection d'engins d'explosifs, détection des mouvements de l'ennemi dans les champs de bataille).

Toutefois, les RCSF ne sont pas parfaits. En effet, compte tenu de leur petite taille, leur faible coût et leur déploiement dans des zones souvent hostiles ou difficiles d'accès, les nœuds capteurs présentent un certain nombre de faiblesses parmi lesquelles une énergie limitée, donc une durée de vie du réseau limitée, une bande passante réduite, de faibles capacités de capture, de traitement et de

communication. Ces limitations causent des instabilités de topologies, des dégradations de la couverture de la zone et de la connectivité du réseau, etc. Ainsi, afin de surmonter ces limitations critiques des RCSF, plusieurs problématiques de recherche sont nées ces dernières années et les principales portent sur l'optimisation de la consommation énergétique dans l'objectif d'améliorer la durée de vie du réseau. D'autres recherches menées actuellement dans le domaine des RCSF et qui sont généralement complémentaires et/ou en conflits à celles portant sur la durée de vie du réseau, concernent les problématiques de couverture de zones ou de cibles, de connectivité du réseau, de placement des nœuds et de routage.

Cependant, la plupart des solutions proposées ne traitent pas en même temps toutes ces problématiques citées plus haut dans leurs modèles de résolution, alors que dans beaucoup d'applications des RCSF telles que la surveillance de zone critique, le monitoring de l'habitat, l'agriculture intelligente, il est primordial de garantir en même temps une couverture complète de zone de surveillance et une connectivité du réseau, tout en essayant d'optimiser au mieux la durée de vie du RCSF.

## **2. Objectifs de recherche**

Le but de cette thèse est de proposer de nouveaux mécanismes efficaces pour l'optimisation de la durée de vie dans les RCSF, tout en garantissant les contraintes de couverture totale de la zone de surveillance et de connectivité du réseau.

Les objectifs spécifiques de cette thèse sont :

- a) Faire une étude et une analyse des mécanismes existants sur les stratégies de placement des nœuds et les techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous des contraintes de couverture et de connectivité ;
- b) Proposer, en fonction des limitations de l'état de l'art de nouvelles méthodes de placement optimal des nœuds afin de couvrir complètement une zone de surveillance donnée et d'assurer une connectivité du RCSF ;
- c) Proposer, en fonction des limitations actuelles, de nouveaux mécanismes efficaces pour l'ordonnancement des états d'activités des capteurs afin d'optimiser la durée de vie du réseau, tout en sauvegardant les propriétés de couverture complète de la zone d'intérêt et celles de connectivité du RCSF ;

- d) Evaluer nos propositions de façon analytique et par des simulations et faire des comparaisons avec d'autres propositions de l'état de l'art.

### **3. Contributions**

Pour atteindre nos objectifs, nous avons fait des contributions à deux niveaux :

1. *Contribution 1* : « une nouvelle méthode de placement optimale des nœuds capteurs a été proposée ». Dans cette méthode de placement géométrique, la zone de surveillance est partitionnée en grilles carrées de mêmes dimensions. Les nœuds capteurs sont placés en fonction de leurs coordonnées au milieu de certaines grilles bien choisies de telle sorte que la totalité de la zone de surveillance reste entièrement couverte et que le graphe formé par l'ensemble des nœuds capteurs soit  $k$ -connexe (avec  $k \geq 4$ , ce qui donne une bonne connectivité du réseau).
2. *Contribution 2* : « nous avons mis en place une nouvelle méthode d'ordonnement distribué des états d'activités des capteurs (actifs ou éteints), qui est basée sur notre méthode de placement des nœuds et qui permet d'optimiser la durée de vie du réseau, tout en satisfaisant aux contraintes de couverture complète de la zone et celles de connectivité du réseau ».

### **4. Organisation du manuscrit de thèse**

Ce mémoire de thèse est composé de cinq chapitres. Le premier chapitre présente un état de l'art des RCSF avec leurs différentes caractéristiques, leurs domaines d'applications et les modèles de communication utilisés. Le chapitre 2 se focalise sur l'étude des différentes techniques d'optimisation, de la durée de vie dans les RCSF sous des contraintes de couverture et de connectivité, et les problématiques liées à ces techniques. Les chapitres 3 et 4 sont respectivement consacrés à la présentation de nos propositions et à leur évaluation par des simulations. Enfin, le chapitre 5 termine notre travail par une synthèse et quelques perspectives pour la poursuite de nos recherches.



# Chapitre 1 : Etat de l'art sur les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)

## 1.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, nous allons faire un état de l'art sur les RCSF en décrivant leur fonctionnement, leurs architectures, leurs différents domaines d'applications. Les modèles de communication utilisés sont également étudiés.

## 1.2 Fonctionnement des RCSF

Un RCSF est composé d'un grand nombre de capteurs placés dans une zone d'intérêt donnée et qui coopèrent ensemble dans le but d'accomplir une tâche commune. Cette dernière peut être la surveillance d'un champ de bataille dans les applications militaires, la surveillance d'une zone à risque ou difficile d'accès, la surveillance de l'environnement, la surveillance d'un parking, d'un entrepôt, d'une place publique, la surveillance d'une forêt afin de pouvoir détecter en temps réel des feux de forêts, la surveillance de troupeaux pour les pâturages, le contrôle de production dans l'industrie, le contrôle et le suivi environnemental, etc. Chaque capteur déployé dans de zone de surveillance doit en permanence surveiller l'environnement qui l'entoure afin de détecter et de mesurer d'éventuels paramètres sur cet environnement et de les transmettre éventuellement à une station de base via un mécanisme de routage donné qui est souvent une communication multi-sauts. Les rayons de détection et de communication de chaque capteur étant limités, chaque nœud capteur doit ainsi accepter de relayer les données collectées par d'autres nœuds capteurs afin de les acheminer de proche en proche jusqu'au centre de traitement, c'est-à-dire vers le lieu où ces données doivent être traitées et éventuellement exploitées par un utilisateur final donné qui est connecté au réseau via Internet ou un système satellite. La figure 1 montre un exemple de RCSF.

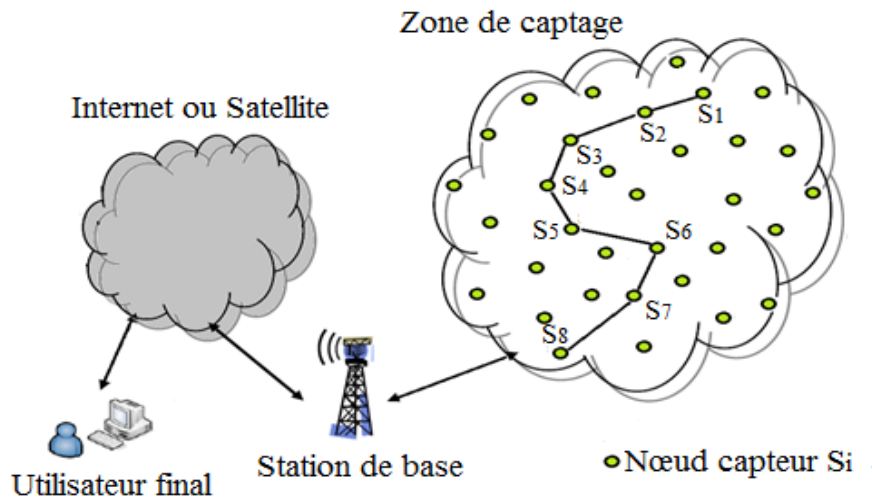


Figure 1 : Exemple d'un réseau de capteur sans fil

Dans l'exemple illustré par la figure 1 ci-dessus, les nœuds capteurs sont déployés de manière aléatoire ou déterministe dans une zone d'intérêt donnée (zone de captage). Une station de base ("BS : Base Station" en Anglais) située en dehors de cette zone d'intérêt est chargée de récupérer les données collectées et envoyées par les différents nœuds capteurs. Ainsi, lorsqu'un nœud capteur donné détecte un événement pertinent, il capture une mesure sur cet événement l'envoie à la BS par le biais d'un routage multi-sauts.

### 1.3 Structure d'un nœud capteur sans fil

Un nœud capteur sans fil est composé de quatre unités de base comme illustrées sur la figure 2.

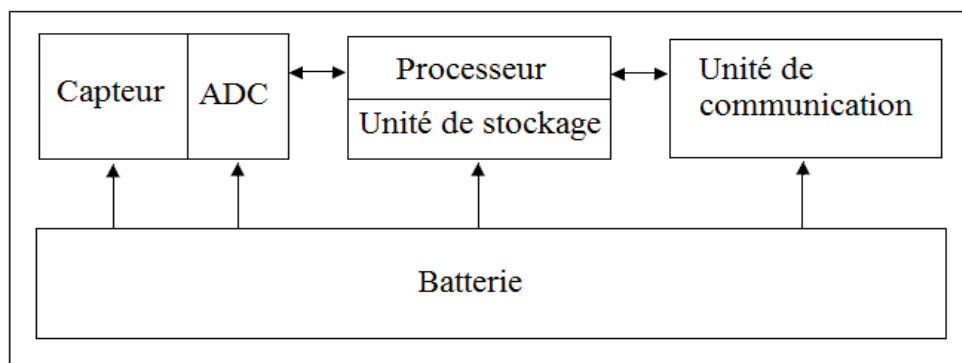


Figure 2 : Les composants de base d'un nœud capteur sans fil [1]

Les différentes unités de base sont décrites dans les sections ci-dessous.

#### 1.3.1 Unité d'acquisition

Elle est généralement composée de deux sous-unités : les capteurs et les convertisseurs analogique numérique ("ADC: Analog Digital Converter" en Anglais). Les capteurs permettent d'obtenir des

mesures numériques sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques que les ADC convertissent à leur tour en signaux numériques.

### **1.3.2 Unité de traitement (processeur)**

Cette unité est composée de deux interfaces qui sont l'interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec l'unité de communication. Son rôle est de contrôler l'ensemble des procédures permettant à un nœud capteur de collaborer avec les autres nœuds dans le but de réaliser les tâches d'acquisition et de stockage des données collectées. Elle fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs (par exemple TinyOS). Ainsi, elle est responsable de l'exécution des différents protocoles de communications permettant la collaboration entre les nœuds capteurs du RCSF. Elle peut également analyser et agréger des données capturées par plusieurs nœuds sources différents afin d'alléger certaines tâches à la station de base.

### **1.3.3 Unité de communication**

L'unité de communication ("Transceiver" en Anglais) est composée d'un émetteur/récepteur qui permet aux nœuds capteurs du réseau de pouvoir communiquer entre eux par l'intermédiaire de liaisons radio. Ainsi, elle effectue toutes les émissions et réceptions des données sur le support sans fil. Elle peut être de type optique ou de type radio fréquence. Notons que les supports de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Toutefois, ces supports ne pouvant pas établir de liaisons à travers des obstacles, ils présentent l'inconvénient d'exiger une vue directe entre les entités communicantes. En revanche, les unités de transmission de type radio fréquence comprennent des circuits de modulation, de démodulation, de filtrage et de multiplexage. Les caractéristiques de ces circuits peuvent ainsi avoir des incidences sur la complexité et le coût du nœud capteur.

### **1.3.4 Batterie**

Elle permet d'alimenter les différentes unités énumérées du nœud capteur décrites ci-dessus. L'énergie fournie par les batteries des capteurs est l'une des ressources les plus précieuses dans un RCSF, parce qu'elle influe directement sur la durée de vie des nœuds capteurs et donc du réseau entier. La consommation énergétique des capteurs est donc un des critères fondamentaux qu'il faut tenir en compte dans la conception et de déploiement d'un RCSF donné.

Il existe plusieurs types de capteurs (capteurs de son, de température, de pression, des caméras capteurs sans fils, etc.). Ainsi, plusieurs constructeurs dans le marché mondial qui se sont lancés dans la fabrication de ces équipements ont vu leur utilisation croître dans plusieurs domaines

aujourd'hui. Parmi ces constructeurs, nous pouvons citer Crossbow, Cisco, Dalsa, EuroTherm, et Sens2B. La figure 3 montre un capteur intelligent MICA2 fabriqué par Crossbow [17].



Figure 3 : Exemple de capteur intelligent MICA2 de Crossbow [17]

#### **1.4 Domaines d'applications des RCSF**

Les RCSF ont été classés parmi les 21 technologies les plus importantes de ce siècle [2]. Nous allons présenter dans la section suivante les principaux domaines d'application des RCSF.

##### **1.4.1 Applications militaires**

Le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. En effet, les différents avantages qu'offrent ces réseaux qui sont entre autres le déploiement rapide, le coût réduit des équipements, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes qui rendent ce type de réseaux très appréciable dans le domaine militaire. Un réseau de capteurs déployé dans un champ de bataille dans un secteur stratégique ou dans une zone difficile d'accès, ceci permet par exemple de surveiller tous les mouvements de l'ennemi ou d'analyser le terrain (détection de mines, d'agents chimiques, biologiques, des radiations, etc.) avant de déployer des troupes. Ainsi, beaucoup de projets dans le domaine des RCSF ont été lancés dans le but d'aider des unités militaires et pour protéger des villes contre des attaques telles que les menaces terroristes, etc. Dans ce cadre, nous pouvons citer le projet DSN (Distributed Sensor Network) [3] de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) qui a été l'un des premiers projets dans les années 80 ayant utilisé les réseaux de capteurs pour le rassemblement de données distribuées en vues d'une exploitation.

##### **1.4.2 Applications de surveillance**

L'application des RCSF dans le domaine de la sécurité peut permettre d'économiser considérablement les dépenses consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, avec des réseaux intelligents et autonomes, les structures d'avions, de navires, d'automobiles, de métros, les places publiques peuvent être suivies en temps réel. De même que les réseaux de

circulation ou de distribution de l'énergie peuvent être suivi et contrôlé en temps réel par des RCSF. Par ailleurs, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts, les routes, les quais, les voies ferrées, les bâtiments peuvent aider à détecter d'éventuelles fissures ou des altérations dans les structures en cas de séismes ou de vieillissements de ces structures. Un réseau de capteurs de mouvements peut constituer un système d'alarme distribué qui servira à détecter les intrusions sur un large secteur donné. On peut également installer des RCSF afin de surveiller en temps réel des parkings de véhicules, de grands stocks, ou de détection de feu de forêts.

Toutefois, la plupart des applications de sécurité exigent des contraintes de couverture complète de zone de surveillance et de connectivité optimale du réseau, qui doivent être prises en compte lors de leurs conception/déploiement. Ce type d'applications des RCSF est également appelé « *surveillance de zone critique* ». Par exemple, c'est le cas des applications de surveillance par des caméras de capteurs sans fil ("WCS : Wireless Camera Sensor" en Anglais) qui nécessitent une couverture complète de la zone surveillée par les capteurs, ainsi qu'au maintien de cette couverture durant toute la durée de vie du réseau.

### **1.4.3 Applications environnementales**

Le contrôle des paramètres environnementaux par des RCSF peut donner naissance à plusieurs applications [4]. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu, et par la suite peut faciliter les moyens de lutte en temps réel. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air. De même, le déploiement de capteurs dans les sites industriels peut empêcher et prévenir certains risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques radioactifs, etc.). Des nœuds capteurs peuvent également être déployés dans l'espace ou au fond des océans à partir d'avions, de ballons ou dans des navires afin de mesurer des paramètres environnementaux sur ces champs de captages, et signaler d'éventuels problèmes environnementaux (par exemple des pollutions, des aléas météorologiques, etc.). Ceci permettra ainsi d'améliorer la maîtrise de ces environnements et l'efficacité des moyens de lutte en cas de problèmes.

### **1.4.4 Applications médicales**

L'implémentation de nœuds capteurs dans des organismes vivants peut aider les médecins à recueillir des mesures sur certains paramètres physiologiques et faire le suivi en temps réel des fonctions vitales de ces organismes. Par ailleurs, des gélules multi-capteurs ou des micro-caméras

peuvent être avalées sans recours à la chirurgie et permettre la transmission d'images de l'intérieur d'un corps humain. D'autres applications biomédicales basées sur les RCSF existent également aujourd'hui, citons la surveillance de la glycémie, la détection précoce de cancers, etc. Ainsi avec de telles applications, la médecine classique entre dans l'ère du sans fil connue sous le nom de « *médecine sans fil* » [81]. Avec cette médecine sans fil, un médecin peut ainsi consulter ses patients à distance afin de recueillir des données médicales sur ces derniers et de donner suite. Il peut également se connecter à Internet via son ordinateur et utiliser une application dédiée qui représente le centre de traitement des données recueillies par les micro-capteurs sur ses patients. Par exemple, la figure 4 montre un système de monitoring cardiaque d'AliveCore proposé avec un capteur biométrique et une application pour iPhone [81].



*Figure 4: Exemple d'un système de monitoring cardiaque d'AliveCore avec capteur biométrique et application pour iPhone [81]*

#### **1.4.5 Applications commerciales**

Des RCSF peuvent être utilisés dans le domaine commercial afin d'aider les commerçants à améliorer le processus de stockage la livraison des marchandises. On peut par ailleurs, interroger le RCSF prévu à cet effet pour connaître à tout moment la position, l'état et la direction d'une marchandise donnée ou d'une cargaison. Ainsi, un client dans l'attente d'une marchandise donnée pourra alors avoir un avis de livraison en temps réel. En outre, les produits en fin de vie pourraient être mieux démontés et recyclés ou réutilisés avec l'utilisation de RCSF. Des entreprises manufacturières, via des RCSF pourraient également suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'à la livraison finale d'un produit donné. Ainsi, grâce à l'utilisation des RCSF dans le domaine commercial, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts.

#### **1.4.6 Applications domotiques**

La domotique est un domaine d'application dans lequel les RCSF émergent de plus en plus. Des

RCSF peuvent être déployés pour le “monitoring” de l’habitat et les nœuds capteurs forment ainsi un environnement intelligent permettant de fournir toutes les informations nécessaires aux applications de confort, de sécurité et de maintenance de cet habitat. Dans de telles applications, les capteurs sont généralement des capteurs de détection de présence, des capteurs de sons, des caméras de capteurs sans fil, etc. Dans d’autres applications, des systèmes domotiques de chauffage, de climatisation, d’éclairage ou de distribution d’eau pourraient aider à optimiser l’efficacité grâce à des nœuds capteurs présents dans des tuiles, des murs des immeubles, etc. Un RCSF déployé dans de telles applications peut ainsi former une « *maison intelligente* », autonome et capable de comprendre les situations en fonction du comportement des occupants, et d’en déduire des actions qui peuvent aider à une prise de décision efficace et en temps réel.

#### **1.4.7 Applications agricoles**

Des RCSF peuvent être déployés dans des champs agricoles et incorporés dans la terre afin de faire des mesures sur certains paramètres tels que le taux d’humidité, la température, etc. Ainsi, la collecte de ces paramètres envoyés généralement à un centre de traitement peut aider les agriculteurs dans l’optimisation de l’irrigation en eau ou de nutriments. Le RCSF peut être interrogé afin de déterminer les secteurs les plus secs et les irriguer en priorité. Ce type d’application des RCSF dans le domaine agricole est de plus en plus utilisé aujourd’hui et est communément appelé « *agriculture intelligente ou agriculture de précision* ». Nous utiliserons le terme agriculture intelligente dans la suite du document pour désigner ce type d’application des RCSF. Elle permet l’utilisation des RCSF comme un outil d’aide à la décision et fournit aux agriculteurs une meilleure maîtrise des processus. Elle leur permet d’acquérir des mesures en temps réel qui sont indispensables à une gestion optimale des champs agricoles. Grâce aux RCSF, de vastes zones géographiques dépourvues généralement d’infrastructure pourront être surveillées en temps réel par des nœuds capteurs. Les données recueillies par ces capteurs peuvent être traitées et envoyées à un utilisateur final pour exploitation. Toutefois, ce type d’application exige quelques contraintes qui portent essentiellement sur la garantie d’une couverture complète de la zone agricole et celle d’une connectivité optimale du réseau. Elle requiert aussi une durée de vie du réseau optimisée qui puisse couvrir au moins tout le temps nécessaire au processus d’évolution des cultures.

Ainsi, cette agriculture intelligente a pour principaux objectifs :

- l’optimisation des apports aux cultures (semences, eau d’irrigation, fertilisants et produits phytosanitaires) dans le but d’améliorer le rendement ;
- la lutte contre l’insuffisance et l’insécurité alimentaire surtout dans les pays en

développement ;

- la réduction des effets néfastes de l'agriculture sur l'environnement.

Les images (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (f) et (i) de la figure 5 montrent quelques exemples d'illustrations d'applications de RCSF [15].



Figure 5: Quelques exemples d'illustrations d'applications des RCSF [15]

## 1.5 Architecture des RCSF

Les architectures dans les RCSF dépendent des applications et des techniques utilisées pour la transmission des données capturées par des différents nœuds capteurs vers la station de base. On distingue principalement deux types d'architectures pour les RCSF qui sont les architectures à plat et les architectures hiérarchiques [47]. Nous allons présenter dans la section suivante ces deux types d'architectures.

### 1.5.1 Architecture à plat

Dans les architectures à plat, tout nœud capteur peut communiquer directement avec le centre de traitement en utilisant une forte puissance d'émission ou par l'intermédiaire d'un mode de communication multi-sauts en utilisant une puissance d'émission beaucoup plus faible. Dans le premier cas, la consommation énergétique du nœud pour l'envoi au centre de traitement est plus importante à cause de la puissance élevée utilisée ; ainsi ces nœuds peuvent rapidement épuiser leur



énergie avec ce mode de transmission. Dans le cas de la communication multi-sauts qui est le plus fréquent, un nœud capteur qui veut transmettre ses données à un autre nœud destinataire se trouvant hors de sa portée de transmission (par exemple la station de base), peut utiliser d'autres nœuds intermédiaires comme relais (routeurs). Ce mode offre comme principaux avantages la possibilité de passage à l'échelle, la gestion des redondances et des tolérances aux pannes.

Cependant, on peut noter comme inconvénients une consommation d'énergie plus importante dans l'ensemble du réseau. Cette dernière est induite par la communication multi-sauts dans laquelle d'autres nœuds capteurs vont participer au routage et dissiper leur énergie pour relayer des paquets provenant d'autres nœuds. Toujours par rapport à ce mode de communication multi-saut, nous pouvons noter une latence plus importante causée par les passages des messages par plusieurs relais multi-sauts avant d'arriver à destination. Enfin, dans ce mode de communication, nous pouvons souligner des problèmes de sécurité dû au fait que des données qui ne sont pas destinées à des nœuds tiers intermédiaires (relais) peuvent être reçues, traitées et transmises par ces derniers. La figure 6 illustre un exemple de RCSF fonctionnant selon un mode d'architecture à plat.

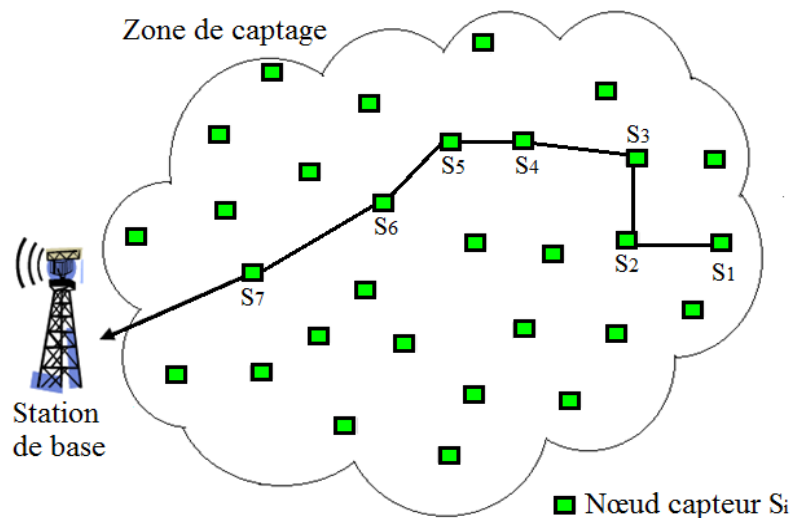


Figure 6: Exemple d'un RCSF fonctionnant selon un mode d'architecture à plat

### 1.5.2 Architecture hiérarchique

Dans les architectures hiérarchiques, le réseau est partitionné en clusters. Dans chaque cluster, un nœud appelé "CH : Cluster Head" est élu et ce dernier représente tous les nœuds membres de son cluster. Ainsi, tout nœud capteur doit être soit CH, soit membre d'un cluster. Un nœud qui n'est pas CH ne peut pas envoyer directement ses données capturées à la station de base. Il les envoie ainsi à son CH qui à son tour peut envoyer ces données à la station de base. Les CH peuvent également agréger des données reçues de plusieurs sources différentes avant de les envoyer à la station de

base, allégeant ainsi cette dernière de certaines tâches de traitements, et diminuant aussi le trafic dans le réseau.

Les avantages de ce mode hiérarchique sont la simplicité, la faible consommation énergétique surtout pour les nœuds capteurs non CH et une latence plus faible entre les CH et la station de base, puisqu'ils envoient directement les données à cette dernière. L'inconvénient majeur est que chaque CH constitue un point de défaillance unique. En plus, ce mode nécessite beaucoup de messages de signalisations pour l'élection et la maintenance des CH. Nous pouvons également noter comme inconvénient, des problèmes de passage à l'échelle. La figure 7 illustre un RCSF fonctionnant selon l'architecture hiérarchique en clusters.

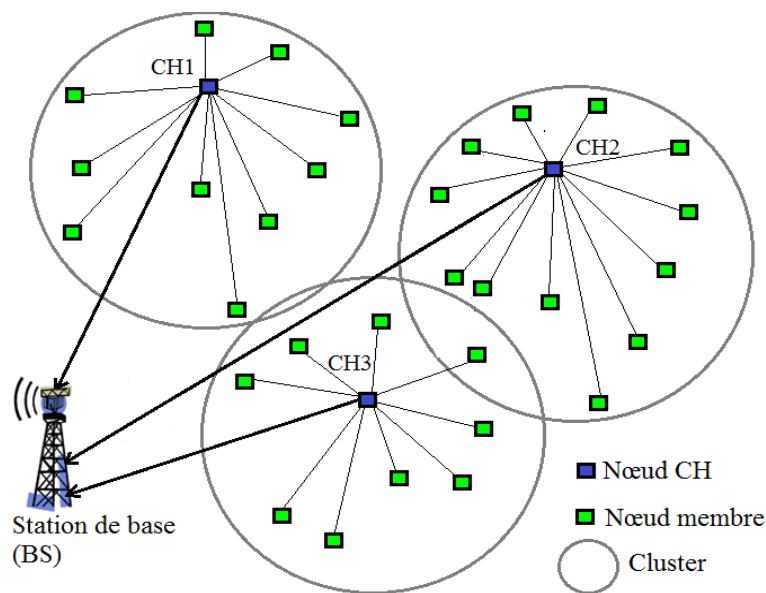


Figure 7: Exemple d'un RCSF fonctionnant selon une architecture hiérarchique en clusters

## 1.6 Modèles de communication dans les RCSF

Pour la gestion de la communication dans les RCSF, c'est l'approche qui gère celle dans les réseaux conventionnels qui a été adoptée. Cette approche est basée sur une subdivision de la communication en couches dans laquelle chacune d'elles a un rôle particulier à jouer. Le fonctionnement de cette pile de communication ainsi que le rôle de chaque couche sont détaillés dans la section ci-dessous.

### 1.6.1 Modèle en couche

La communication dans les RCSF est régie suivant le modèle en couche schématisé sur la figure 8. Ce modèle décrit les différentes couches de la communication, leurs rôles ainsi que les différents plans de gestion de l'énergie, de la mobilité et des tâches. Ce modèle a pour rôle de standardiser la communication entre les différents composants du réseau afin que les matériels de différents

constructeurs puissent être compatibles. A l'instar du modèle de référence OSI (Open System Interconnexion), ce modèle comporte cinq couches qui sont la couche physique, la couche liaison de donnée, la couche réseau, la couche transport et la couche application. Ces couches ont les mêmes rôles que celles de la pile OSI. Notons cependant, que cette pile de communication pour les RCSF comporte trois autres couches dédiées respectivement pour les fonctions de gestion de l'énergie, de la mobilité et celles des tâches (interrogation du RCSF). Comme pour le modèle OSI, chaque couche communique avec sa couche homologue via un ou des protocoles. Toujours à l'image du modèle OSI, chaque couche utilise les services des couches inférieures et en fournit aux couches de niveaux supérieurs.

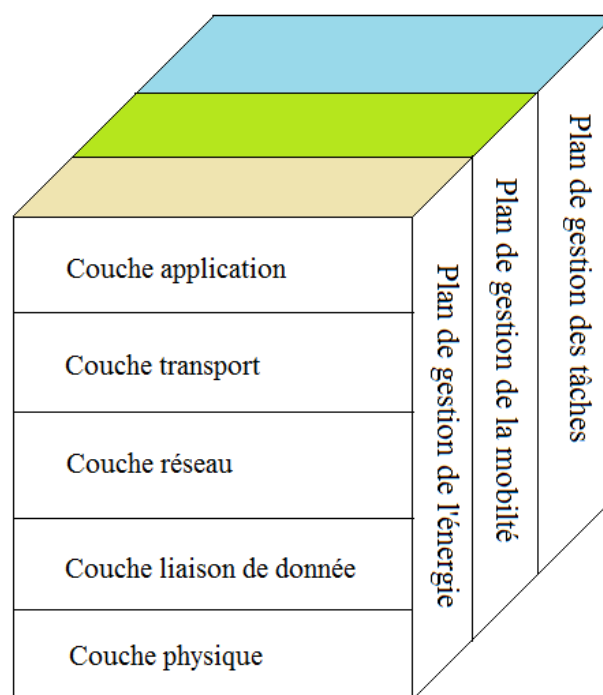


Figure 8: Modèle en couche pour la communication dans les RCSF [5]

La section suivante décrit le rôle des différentes couches du modèle ci-dessus, ainsi que ceux des différentes couches de gestions.

### 1.6.1.1 La couche physique

La couche physique spécifie les caractéristiques matérielles, les techniques de modulation, la détection de porteuse, la conversion des signaux numériques, analogiques, optiques.

### 1.6.1.2 La couche liaison de donnée

La couche liaison de donnée permet de contrôler la liaison logique. Elle permet aussi de spécifier comment les données sont expédiées entre deux paires de nœuds capteurs avec une distance d'un

saut. Ainsi, le protocole MAC de cette couche liaison permet de gérer l'accès au support physique en évitant les collisions causées souvent par l'accès concurrentiels à ce médium physique. Cette couche est également responsable du multiplexage des données et du contrôle des erreurs de transmission. En outre, elle assure la liaison point à point et multipoint du réseau dans les RCSF.

### **1.6.1.3 La couche réseau**

Le rôle principal de la couche réseau est de router les données fournies par la couche transport de façon fiable jusqu'à la station de base, tout en essayant d'optimiser au mieux la consommation énergétique induite par l'ensemble des nœuds capteurs participant à ce routage.

### **1.6.1.4 La couche transport**

La couche transport est chargée du transport fiable des données et du contrôle de flux. Pour bien mener ces fonctions, elle divise les données issues de la couche application du nœud source en segments avant leur envoi dans le réseau. Du côté du récepteur, ces données issues de la couche réseau sont réordonnées et réassemblées avant d'être envoyées à la couche application. Cette couche peut également gérer les files d'attente des paquets avant leurs transmissions à la couche réseau.

### **1.6.1.5 La couche application**

La couche application est la couche la plus haute. Elle assure l'interfaçage avec les applications. Ainsi, suivant le type de nœud capteur, différents types d'applications peuvent être mises en œuvre. Cette couche gérée directement par les logiciels utilisateurs est le niveau le plus proche des utilisateurs. La couche application peut également gérer l'agrégation des données avant leur transfert à la couche transport.

Le rôle de chacun des différentes couches de gestion est décrit dans les paragraphes suivants.

### **1.6.1.6 La couche de gestion de l'énergie**

La couche de gestion de l'énergie contrôle l'utilisation de la batterie. Par exemple, après la réception d'un message, le module radio du nœud récepteur peut être éteint afin que ce dernier puisse économiser son énergie. En outre, si le niveau d'énergie d'un capteur donné devient très faible (généralement en dessous d'un seuil donné), alors ce nœud peut diffuser une alerte à l'ensemble de ses voisins afin de les informer qu'il ne peut plus participer au routage, ce qui peut renforcer la tolérance aux pannes. L'énergie résiduelle de ce nœud pourra ainsi être réservée pour d'autres fonctions, par exemple le captage.

### **1.6.1.7 La couche de gestion de la mobilité**

La couche de gestion de la mobilité permet de détecter et d'enregistrer le mouvement d'un nœud capteur donné dans la zone d'intérêt. Un retour arrière vers l'utilisateur est toujours conservé et le nœud peut garder des traces sur l'ensemble ses nœuds voisins. Avec les informations sur l'état de ses voisins, les nœuds capteurs peuvent mieux coordonner et gérer l'utilisation de leur énergie pour la réalisation de leurs différentes tâches.

### **1.6.1.8 La couche de gestion des tâches**

Enfin, la couche de gestion des tâches permet de faire l'ordonnancement des différentes tâches de captage des données dans une zone de surveillance donnée. Dans certaines topologies de déploiements denses où les champs de captages sont souvent redondants, il n'est pas nécessaire que tous les nœuds capteurs d'une zone donnée effectuent en même temps une tâche donnée. Certains nœuds capteurs peuvent donc effectuer les tâches de captage au moment où d'autres nœuds vont se mettre dans le mode éteint afin de sauvegarder leur énergie.

D'après la description des différentes tâches de gestions ci-dessus, nous remarquons que ces dernières sont nécessaires pour la coordination entre les différents nœuds, la gestion de leur mobilité ainsi que l'optimisation de la consommation énergétique dans le réseau. Par conséquent, avec une bonne utilisation intelligente de ces tâches et selon le type d'application, les performances du RCSF peuvent être optimisées.

## **1.6.2 Piles de communication pour capteurs**

Les réseaux sans fil (WLAN, Ad hoc) classiques ne sont pas appropriés aux applications des RCSF à cause de leur complexité, leur coût élevé et la consommation énergie non contrôlée. C'est dans ce contexte que les normes IEEE 802.15.4 et ZigBee ont été mises en place pour développer un standard global adapté aux systèmes sans fil qui ont de faibles capacités. Ce standard est aussi caractérisé par un coût réduit et une basse consommation énergétique.

### **1.6.2.1 La norme IEEE 802.15.4**

La norme IEEE 802.15.4 [6] définit les spécifications des sous-couches PHY et MAC pour la connectivité sans fil de dispositifs fixes ou mobiles à faibles capacités (débit faible, batterie très limitée, etc.). Ces réseaux encore désignés sous le nom de WPAN (Wireless Personal Area Network) sont utilisés pour des communications sans fil sur de courtes distances (généralement des couvertures de dizaines à des centaines de mètres). Le coût de l'infrastructure de tels réseaux est relativement faible par rapport aux autres réseaux locaux sans fil. La norme IEEE 802.15.4 spécifie

deux modes de communication qui sont un mode sans balise (non beacon-enabled) et un mode avec balise (beacon-enabled). En mode non-beacon, les nœuds communiquent de leurs propres initiatives quand le canal est libre en utilisant la technique d'accès CSMA-CA.

En mode beacon ou synchronisé, soit les nœuds communiquent librement pendant une période fixée (slotted CSMA-CA), soit des fenêtres temporelles sont réservées (GTS, Garanted Time Slot) pour les communications et ces dernières sont gérées par un nœud coordonnateur. Chaque slot a la structure d'une super-trame et est composée de deux parties : une période inactive où toutes les stations dorment et une période active composée de 16 slots. On distingue deux parties dans les 16 slots : Contention Access Period (CAP) et Contention Free Period (CFP). Dans CFP, un GTS (Guaranteed Time Slots) peut être constitué de plusieurs slots, attribués à un seul nœud, pour une transmission (t-GTS) ou pour une réception (r-GTS). Dans CAP, on utilise des slots de contention plus petits. Chaque slot de contention a une longueur de 20 symboles. Cette dernière représente la plus petite unité de backoff. Dans ce cas, les nœuds entrent en contention suivant le mécanisme CSMA-CA.

Deux paramètres permettent de déterminer la longueur de la super-trame. Ces paramètres sont SO (qui détermine la longueur de la période active) et BO (qui détermine la longueur de la période d'un beacon). Les deux paramètres SO et BO sont liés par la relation (1.1).

$$0 \leq BO \leq SO \leq 14 \quad (1.1)$$

Si on choisit  $0 \leq SO \leq BO \leq 14$ , alors le réseau est en mode beacon. La norme IEEE 802.15.4 maintient tous les nœuds actifs pendant la période active, ce qui n'est pas optimal en termes de consommation énergétique.

Le mode beacon est également conçu pour fonctionner dans une topologie en étoile ne supportant pas nativement les réseaux multi-sauts. Cependant, il existe aujourd'hui des travaux qui permettent d'adapter et d'appliquer ce mode suivant une architecture en étoile sous forme de cluster (Cluster tree).

### 1.6.2.2 ZigBee

La norme ZigBee [7] vise les appareils à faible coût et à faible capacité de traitement, de stockage et de communication. Elle s'appuie sur les couches PHY et MAC du standard IEEE 802.15.4 et définit ses propres couches réseau et application au-dessus de ce standard. Notons que ZigBee a d'abord

été dénommé HomeRF-Lite avant de porter successivement les noms de FireFly et RF-EasyLink. C'est une spécification qui a été publiée en 2003 par l'Alliance ZigBee et complétée en 2006 par la norme IEEE 802.15.4-2006 (version B). Les débits de transferts de données sont respectivement 250 Kbps, 100 Kbps, 40 Kbps et 20 Kbps.

La norme définit 27 canaux de communication différents répartis sur trois bandes de fréquences :

- bande 868 -868.6 MHz : 1 canal, 20 Kbps-100 Kbps (pour l'Europe),
- bande 902 -928 MHz : 10 canaux, 40 Kbps-250 Kbps (pour les États-Unis),
- bande 2.4 -2.48 GHz : 16 canaux, 250 Kbps (partout dans le monde).

ZigBee utilise une technique d'étalement de spectre par séquence directe (DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum), avec une modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) pour les bandes de fréquence 868 MHz-915 MHz ; et une modulation OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying) pour la bande de fréquence 2.4 GHz-2.48 GHz. La figure 9 décrit la pile IEEE 802.15.4/ZigBee [7].

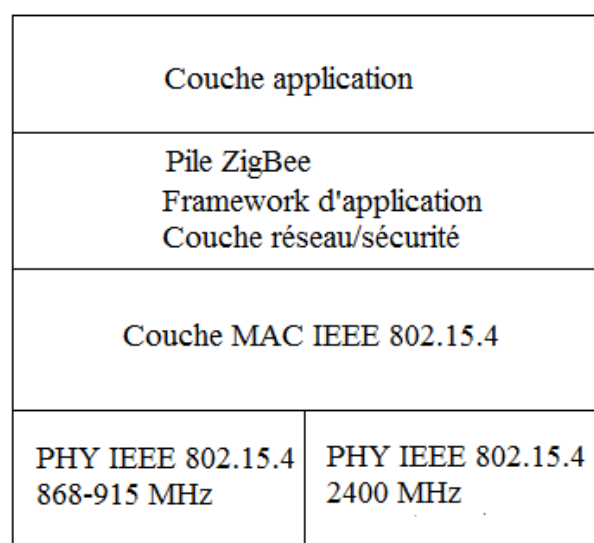


Figure 9: Pile IEEE 802.15.4/ZigBee[7]

Les rôles des différentes couches de cette norme sont décrits ci-dessus :

La couche PHY 2450 MHz utilise la technique de modulation orthogonale (O-QPSK : Offset Quadrature Phase Shift Keying) avec 16 canaux dans la bande 2450 MHz et une fréquence de coupure,  $F_c = 2450 + 5(k - 11)$  en MHz, avec  $k = 11, 12, \dots, 26$ .

Chaque symbole de données est codé sur 4 bits qui sont utilisés pour sélectionner une des 16 séquences à transmettre ("nearly orthogonal Pseudo-random Noise" ou PN). Les séquences PN

successifs sont concaténées et la séquence chip agrégée et modulée dans une porteuse O-QPSK.

*La couche MAC IEEE 802.15.4/ZigBee* utilise :

- la méthode d'accès CSMA-CA ;
- deux modes d'adressage IEEE : une de longueur 64 bits et autre de longueur 16-bits ;
- une structure de trame simple ;
- le mécanisme de "beaconing", c'est-à-dire, un mécanisme de réveil périodique pour la vérification de l'arrivée d'un balise donné ;
- une technique d'économie d'énergie par la mise en veille de la radio entre deux balises ;
- une transmission fiable de données ;

Les nœuds ZigBee peuvent être mis en réseau selon les topologies suivantes : étoile, arbre ou maillée. Les réseaux en arbre et les réseaux maillés sont dotés :

- de nœuds terminaux ZigBee ou RFD (Reduced Function Devices) qui impliquent une pile de protocoles légers et économiques ;
- de nœuds routeurs FFD (Full Function Devices) pour transférer des données via un routage multi-sauts. Notons que les nœuds FFD coordonnent également l'ensemble des autres fonctionnalités du réseau.

*La couche réseau ZigBee* assure le routage et envoie les paquets reçus soit à un autre nœud ZigBee, soit à la sous-couche de support d'application qui décide à son tour à quelle application est destinée ces paquets de données.

*Enfin, la couche application ZigBee* gère les applications utilisateurs.

### **1.6.3 Systèmes d'exploitation pour capteurs**

Beaucoup de systèmes d'exploitation pour les capteurs et plus généralement pour les systèmes embarqués ont été mise en œuvre et implémentés dans les capteurs sans fil. Chacun de ces systèmes offre ses propres caractéristiques et fonctionnalités. Nous présentons dans les sections suivantes certaines de ces systèmes d'exploitation parmi les plus implémentés aujourd'hui dans les nœuds capteurs sans fil.

#### **1.6.3.1 TinyOS**

Le système d'exploitation TinyOS (Tiny Operating System) [8] a été développé par des chercheurs de l'Université de Berkeley. Il s'agit d'un système d'exploitation intégré, modulaire et open source



pour des nœuds capteurs sans fil. Il est écrit en NesC [9]. TinyOS est conçu pour les systèmes embarqués et les systèmes à faibles ressources tels que les capteurs sans fil. Un programme s'exécutant sur TinyOS est constitué d'une sélection de composants systèmes et de composants développés spécifiquement pour l'application à laquelle il sera destiné par exemple l'acquisition de température, du taux d'humidité, de la pression, etc. Ainsi, TinyOS est basé sur les caractéristiques suivantes :

- *évènementiel* : le fonctionnement est basé sur la gestion d'évènements qui sont déclenchés par l'activation de tâches spécifiques ou de leurs interruptions ;
- *non préemptif* : TinyOS ne gère pas le mécanisme de préemption entre les tâches en cours mais donne la priorité aux interruptions matérielles ;
- *non temps réel* : TinyOS est un système temps réel relâché, c'est-à-dire, il ne gère pas des niveaux de priorité entre les différentes des tâches, permettant ainsi de réduire les temps de traitements ;
- *faible consommation énergétique* : TinyOS a été conçu pour optimiser la consommation énergétique des nœuds capteurs. Ainsi, la consommation d'énergie de ces derniers est relativement faible.

### 1.6.3.2 Contiki et Rime

Contiki [10] est un système d'exploitation open source, modulaire, léger et flexible conçu pour des capteurs miniatures et développé par des chercheurs Suédois. Il est destiné à être embarqué dans des capteurs miniatures ayant généralement des ressources limitées (énergie, etc.).

Les principaux avantages sont surtout sa flexibilité, sa portabilité et le fait qu'il supporte des protocoles comme IPv6 et 6LoWPAN. Contiki implémente deux mécanismes de communication :

- *la couche Rime* [11] : elle fournit à la couche applicative des instructions de communication qui permettent les connexions avec les capteurs voisins. Les applications ou protocoles exécutés au-dessus de la couche Rime peuvent utiliser une ou plusieurs instructions de communication fournies par la couche Rime. Celle-ci peut être associée au mécanisme Chameleon afin de s'adapter aux protocoles de la couche MAC. Chameleon gère la création, la lecture et la transformation des en-têtes des protocoles de la Couche liaison de données du modèle OSI et communique avec la couche Rime en associant des attributs aux paquets.
- *la couche uIP* [12] : elle implémente les protocoles uIPv4 et uIPv6. Cette couche supporte également les protocoles IP, TCP, UDP et ICMP. Notons que, uIPv6 est la première implémentation d'IPv6 pour des capteurs miniatures. Contiki implémente le protocole

6LoWPAN prévu pour les communications radio utilisant la norme IEEE 802.15.4. En effet, lors de communications radio via la norme IEEE 802.15.4, la taille d'un paquet est limitée à 127 octets, ce qui est insuffisant pour transmettre un paquet IPv6 dont la taille maximum est de 1280 octets. C'est dans ce cadre que l'IETF a mis en place cette technique.

Le système d'exploitation Contiki permet d'optimiser la consommation énergétique par rapport à d'autres systèmes d'exploitation traditionnels. Toutefois, notons que le manque d'étude comparative rend difficile l'évaluation et la comparaison des performances de ce système d'exploitation par rapport à d'autres.

### **1.6.3.3 MANTIS OS**

MANTIS (Multimodal Networks of In-situ micro Sensor) [13] est un système d'exploitation léger multitâche qui a été conçu pour des capteurs sans fil et développé par le groupe Mantis de l'Université de Colorado boulder. Ce système écrit en langage C peut supporter un grand nombre de plateformes de RCSF. MANTIS est structuré en trois composants principaux qui sont la couche DEV, la couche NET et la couche COM. La couche DEV fournit un accès aux périphériques d'entrées-sorties. La couche COM permet d'accéder aux périphériques de communication tels que le port série et la radio. Cette couche interagit avec la couche MAC. La pile de communication est gérée au niveau utilisateur dans la couche NET. Par défaut, MANTIS utilise un mécanisme d'inondations (flooding) comme protocole de routage.

### **1.6.3.4 SOS**

Le système d'exploitation SOS [14] a été conçu pour des RCSF dynamique et modulaire. La principale motivation de ce système est la reconfiguration dynamique, autrement dit, la capacité de modifier individuellement le code au niveau de chaque nœud capteur après le déploiement du RCSF. Ainsi, des mises à jour et l'ajout de nouveaux modules peuvent être faits à tout moment après le déploiement du réseau. SOS permet également de faire l'allocation dynamique de la mémoire mais ne possède pas de mécanisme de protection de la mémoire. Le noyau SOS comprend une API (Application Programming Interface) pour les capteurs permettant la gestion et l'interaction entre plusieurs nœuds capteurs et les modules utilisés par ces derniers, rendant ainsi une utilisation plus efficace des convertisseurs ADC.

## **1.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons fait un état de l'art sur les RCSF en décrivant leurs fonctionnements, leurs caractéristiques, leurs domaines d'applications. Les architectures et les modèles de communications sont également abordés dans ce chapitre.

Le prochain chapitre est consacré à l'étude des différentes techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous des contraintes de couverture et de connectivité réseau. L'ensemble des problématiques liées à ces techniques d'optimisation sont également discutées.

# **Chapitre 2 : Techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture et de connectivité**

## **2.1 Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'étude des différentes techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous des contraintes de couverture de la zone d'intérêt et de connectivité du réseau. Une discussion sur les problématiques encore ouvertes qui sont liées à ces techniques d'optimisation est également abordée à la fin du chapitre. Cependant, avant d'étudier ces techniques d'optimisation et leurs problématiques, nous allons présenter l'ensemble des facteurs et contraintes qui influent non seulement sur les techniques d'optimisation de la durée de vie, mais également sur les paramètres de couverture de la zone d'intérêt et ceux de connectivité du réseau.

## **2.2 Facteurs et contraintes influents sur la conception et le déploiement de RCSF**

Vues les caractéristiques spécifiques des RCSF, plusieurs facteurs et contraintes doivent être étudiés et pris en compte lors de la conception et le déploiement de ces réseaux. Les principaux facteurs et contraintes sont étudiés dans la section 2.2.1.

### **2.2.1 Durée de vie du réseau**

La durée de vie est une métrique d'évaluation de performance très importante dans les RCSF. Il existe plusieurs définitions de ce paramètre de mesure. Toutefois, notons que sa définition n'est pas toujours triviale.

En effet, dans [29] Giridhar et Kumar présentent la durée de vie d'un RCSF comme étant liée à l'application et aux protocoles utilisés.

Dans [30] Chen et Zhao, conçoivent la durée de vie d'un RCSF comme étant une mesure étroitement liée à la vie des nœuds du réseau.

Quant à Esseghir et al.[31], ils définissent la durée de vie comme étant une autre mesure qui est liée à l'accessibilité des nœuds dans le réseau.

Une définition de la durée de vie d'un RCSF comme étant liée à la qualité de service QoS est proposée dans [32] par Hu et Li.

D'autres chercheurs comme Verdone et al.[33], définissent la durée de vie comme une mesure liée à la répartition spatiale des nœuds dans le réseau.

Dans notre cas d'étude, nous considérons la durée de vie d'un RCSF comme étant liée à l'activité nodale. Donc la durée de vie du RCSF est définie comme étant la durée pendant laquelle le réseau assure toutes les fonctionnalités du réseau (couverture, connectivité, etc.), c'est-à-dire, la durée de vie RCSF mesure dans ce cas, le temps qui s'écoule entre le début de la mise en service du réseau jusqu'à ce que le premier nœud de celui-ci devienne défaillant, et par la suite ne soit plus fonctionnel. Soit  $M = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  l'ensemble des nœuds d'un RCSF donné, et soit  $S_i \in M$  un nœud capteur donné dont la durée de vie est égale à  $T_i$ . Si nous posons  $T_n$  la durée de vie du RCSF, alors elle est donnée par :

$$T_n = \min_{S_i \in M} T_i \quad (2.1)$$

La défaillance d'un nœud capteur est généralement due à une panne de celui-ci, par l'exemple l'épuisement de son énergie résiduelle. Autrement dit, dans ce dernier contexte, la durée de vie peut être définie comme étant le temps qui s'écoule entre la mise en service du réseau jusqu'au temps où le premier nœud du RCSF épuise complètement son énergie. Par conséquent, la durée de vie d'un nœud capteur dans le RCSF dépend essentiellement de la consommation énergétique du nœud en fonction du temps. Cette durée de vie dépend également de l'application mise en œuvre et peut varier entre des heures et des années selon les types d'applications des RCSF.

### 2.2.2 Ressources limitées

Compte tenu de leurs petites tailles et leurs faibles coûts, les nœuds capteurs ont plusieurs limitations telles que des capacités énergétiques de stockage et de traitements limitées, de faibles capacités de détection et de communication. En effet, les rayons de détection et de communication des capteurs varient généralement entre des dizaines de mètres et des centaines de mètres.

En outre, les modèles de communication pour les capteurs sont basés sur les normes IEEE 802.15.4 et ZigBee dont les débits sont relativement faibles (allant de dizaines de Kbps à 250 Kbps). Toutefois, ces débits réduits ne sont pas un handicap pour la plupart des applications de RCSF qui utilisent en général de faibles puissances de transmission.

### 2.2.3 Facteur d'échelle

Plusieurs applications des RCSF exigent généralement un déploiement très dense des nœuds capteurs. Ainsi, le nombre de nœuds déployés pour certaines applications peut être supérieur à des milliers. Ce déploiement dense a pour conséquence des surcharges réseaux très importantes. Par conséquent, les protocoles de communication doivent garantir les fonctionnalités du réseau quel que

soit l'importance de la charge.

#### **2.2.4 Topologie dynamique**

A l'instar des réseaux Ad hoc, les topologies des RCSF sont souvent très dynamiques. Ces changements topologiques sont généralement causés par les contraintes liées à la défaillance des nœuds capteurs, à celles liées à l'environnement de déploiement des capteurs souvent hostile ou inaccessible et aux mobilités possibles des nœuds.

#### **2.2.5 Agrégation des données**

L'absence de planification du déploiement souvent dense des nœuds dans les RCSF peut engendrer des topologies de couvertures redondantes. Dans ce cas de figure, plusieurs capteurs voisins peuvent capturer des mesures qui sont très proches (spatialement et temporairement), et les envoyer en même temps à la station de base. Ainsi, cette dernière peut recevoir des données redondantes via plusieurs sources différentes. Plusieurs protocoles de communication (de niveaux MAC et routage) permettent à la station de base ou à des nœuds intermédiaires de faire l'agrégation de données reçues via des sources différentes avant de les envoyer. Ces techniques peuvent ainsi réduire la charge des données transmises et la consommation énergétique dans l'ensemble du réseau. Les techniques d'agrégation sont généralement utilisées dans les architectures centralisées basées sur le clustering. Dans ce cas les CH sont chargées d'agréger si nécessaire les données reçues via leurs nœuds membres avant leurs transmissions à la station de base.

#### **2.2.6 Etat du module radio**

Le module radio peut être dans quatre états différents [35] qui sont l'état actif, l'état de réception (RX), l'état de transmission (TX) et l'état de sommeil ou "sleep"(radio OFF).

Dans l'état actif, le module radio est allumé mais n'est pas utilisé. Ainsi, dans cet état, le nœud capteur n'est ni entrain de transmettre des données ni entrain de recevoir des données. Dans cet état, le capteur consomme néanmoins de l'énergie due à l'écoute continue du canal de transmission.

Respectivement, dans les états RX et TX, le module radio reçoit et transmet des données.

Enfin, dans l'état sleep, la radio est éteinte. La transition entre ces différents états induit une énergie appelée énergie de transition même si elle est relativement faible par rapport à d'autres formes de dissipation énergétique du capteur. La figure 10 illustre le diagramme de transition entre les différents états d'activité d'un nœud capteur.

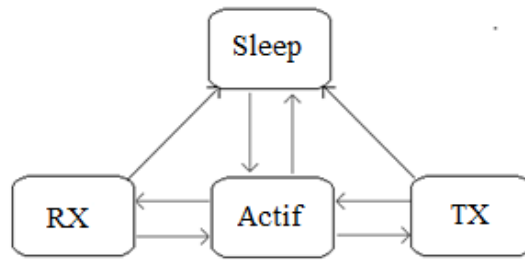


Figure 10 : Diagramme de transition entre les différents états d'activités d'un nœud capteur

### 2.2.7 Méthodes d'accès au support

La couche MAC joue un rôle fondamental dans la pile de communication des RCSF. Elle est chargée entre autre des fonctions de gestion du contrôle d'accès au support de communication, de synchronisation entre les différents nœuds, de détection d'erreurs et des mécanismes de retransmission en cas d'erreurs. Dans l'environnement de communication des RCSF, tous les nœuds à portée partagent le même média de communication qui est le support sans fil. En plus, les protocoles MAC d'accès au support sont généralement basés sur des techniques aléatoires utilisant le protocole d'accès au médium CSMA-CA. Ainsi, des collisions fréquentes peuvent se produire si plusieurs nœuds tentent d'accéder au support en même temps, ce qui va accroître la consommation énergétique des nœuds capteurs qui retransmettent leurs données. Par conséquent, des mécanismes de minimisation de la consommation énergétique doivent être intégrés au niveau de cette couche. Pour ce faire, certaines approches, par exemple dans [36] essayent de minimiser les collisions entre les nœuds capteurs et permettent ainsi de réduire la consommation énergétique dans le réseau.

En plus des retransmissions dues aux collisions, d'autres aspects liés à l'accès au média de transmission peuvent également avoir des incidences néfastes sur la consommation énergétique dans les RCSF. Ces différents mécanismes sont entre autres l'écoute active, la sur-écoute, la taille des paquets, la surcharge et la surémission. Ces différents aspects sont décrits dans les paragraphes ci-dessous.

#### 2.2.7.1 L'écoute active du canal

L'écoute active du canal (ou "idlelistening" en Anglais) consiste pour un nœud donné d'écouter le canal dans l'espérance de recevoir un paquet qui ne sera pas finalement pas reçu. Ainsi, cette forme d'écoute peut entraîner des dépenses inutiles d'énergie. L'une des techniques les plus utilisées pour remédier à ce problème consiste à mettre les nœuds le plus longtemps possible dans l'état sleep.

### **2.2.7.2 La sur-écoute du canal**

La sur-écoute (ou “overhearing” en Anglais) se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. Ce phénomène engendre aussi des dépenses énergétiques inutiles pour ces nœuds en question.

### **2.2.7.3 La taille des paquets**

La taille des paquets échangés dans les RCSF peut influencer sur la consommation énergétique des nœuds, et par conséquent sur la durée de vie du réseau. Cette taille doit être raisonnable pour le réseau et elle doit être aussi conforme pour le type d’application. Ainsi, elle ne doit être ni trop élevée ni trop faible. En effet, si la taille des paquets est très petite, alors non seulement le nombre de paquets pour un message donné augmente mais également le nombre de paquets de signalisation (contrôles). En revanche, si cette taille est très grande, alors une plus grande puissance d’émission sera nécessaire pour transmettre chaque paquet de donnée, ce qui aura comme conséquence une consommation énergétique plus importante. D’autre part, notons que la plupart des protocoles MAC pour les RCSF fonctionnent avec échanges de messages de contrôles (connectivité, établissement de liens, etc.), ce qui nécessite souvent des en-têtes additionnels contribuant ainsi à des coûts énergétiques supplémentaires.

### **2.2.7.4 La surémission**

Le phénomène de la surémission (ou “overemitting” en Anglais) dans les RCSF se produit lorsqu’une source envoie des données à un nœud destinataire qui n’est pas dans l’état RX (n’est pas prêt à recevoir des données). Ainsi, les données envoyées peuvent être perdues alors que la source a dépensé inutilement de l’énergie durant sa transmission.

Compte tenu de tous ces facteurs que nous avons énumérés ci-dessus et du fait que l’énergie est l’une des ressources les plus précieuses dans les RCSF, plusieurs techniques de conservation d’énergie ont été proposées. Ces techniques sont présentées dans la section 2.7.

## **2.3 Méthodes de placement des nœuds capteurs dans les RCSF**

Le placement des nœuds capteurs dans une zone d’intérêt n’est pas obligatoirement déterminé en amont dans la conception et le déploiement d’un RCSF donné. Ainsi, les nœuds peuvent être placés aléatoirement dans la zone d’intérêt ou placés de façon déterministe. Les méthodes de placement des nœuds dépendent généralement du type d’application et du type d’environnement où ils sont déployés. Il existe deux méthodes de placement des nœuds dans les RCSF qui sont le placement



aléatoire et le placement déterministe.

### **2.3.1 Placement aléatoire**

La méthode de placement aléatoire est généralement utilisée pour le déploiement de nœuds capteurs dans des zones inconnues, difficiles d'accès ou inaccessibles (zone de bataille, montagne, atmosphère, etc.). Dans ce cas, les nœuds peuvent être déployés à l'aide de divers moyens, par exemple via des avions, des bateaux, etc. Cependant, ces méthodes de placement aléatoires nécessitent généralement des techniques fréquentes de contrôle de la topologie et de reconfiguration des nœuds dans le but de garantir la stabilité du réseau et d'assurer une transmission efficace des données.

### **2.3.2 Placement déterministe**

Dans le cas où l'environnement de déploiement des capteurs est accessible ou connu, les nœuds peuvent être placés de façon déterministe. Dans ce cas, les nœuds peuvent être placés à des positions fixes et connues en utilisant un système de coordonnées 2D ou 3D. Cependant, pour beaucoup d'applications des RCSF qui exigent un déploiement optimal des nœuds dans la zone de surveillance, il est nécessaire d'étudier et de planifier la méthode de déploiement adéquate lors de la conception et le déploiement du RCSF. En effet, la méthode de déploiement influe grandement sur la performance d'un RCSF [44].

L'étude du placement des nœuds dans un RCSF permet de déterminer le nombre de nœuds capteurs nécessaires pour le déploiement ainsi que la position de chacun dans la zone de surveillance, afin d'assurer toutes fonctionnalités d'une application donnée. Cette méthode de placement permet entre autre de définir la topologie du RCSF.

Les méthodes de placement des nœuds dans les RCSF sont étroitement liées aux propriétés de couverture et de connectivité des RCSF. Nous allons étudier respectivement dans les sections 2.4 et 2.5 les notions de couverture et celles de connectivité dans les RCSF.

## **2.4 Couverture dans les RCSF**

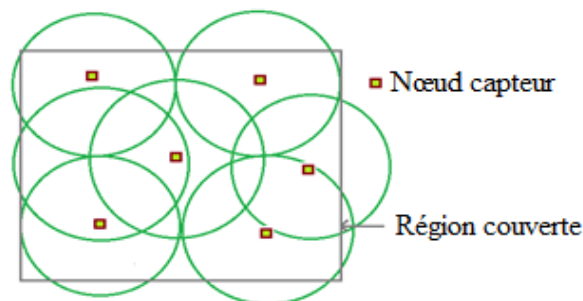
### **2.4.1 Définition de la couverture dans les RCSF**

La couverture dans les RCSF est souvent considérée comme étant une mesure de performance très importante. Elle reflète la façon dont une zone donnée est surveillée (contrôlée), c'est-à-dire comment chaque point de la zone de surveillance est observée et suivie par l'ensemble des nœuds

capteurs [43]. Ainsi, la notion de couverture dans les RCSF peut être vue comme une mesure de la QoS. En effet, certaines applications peuvent exiger un fort degré de couverture afin de remplir pleinement leurs missions. Par exemple, c'est le cas de la surveillance critique de zone, l'agriculture intelligente, etc. Ainsi, pour ces applications, il faut faire en sorte que si un événement se produit en un point quelconque de la zone surveillée par les capteurs, il soit détecté au moins par un capteur donné. Les applications telles que la surveillance animale, la mesure de température à l'intérieur d'un bâtiment requièrent des degrés de couverture plus faibles. D'autres applications comme la détection d'intrusion fonctionnent généralement avec un degré de couverture dynamiquement ajustable en fonction des zones de détection en alerte. Par conséquent, la nécessité de couverture d'une zone donnée varie en fonction des besoins applicatifs et doit être prise en considération dans la conception et le déploiement de certaines applications des RCSF.

#### 2.4.2 Types de couvertures dans les RCSF

Il existe deux types de couverture dans les RCSF : une couverture simple et k-couverture définie comme étant une multitude de couvertures simples et dépendantes de la robustesse et du degré de l'application[40]. Les figures 11 et 12 illustrent respectivement des exemples de couverture simple et de couverture multiple d'une région par un ensemble de capteurs.



*Figure 11 : Exemple d'illustration de la couverture simple*

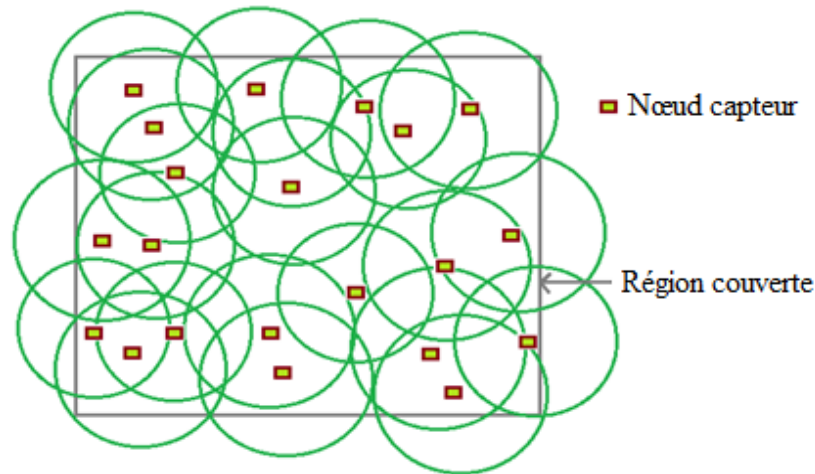


Figure 12 : Exemple d'illustration du mécanisme de couverture multiple ( $k$ -couverture)

La  $k$ -couverture est également définie dans [41, 42] pour un RCSF composé de  $N$  nœuds,  $M = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  selon une couverture qui satisfait aux deux conditions suivantes :

- Satisfaction des conditions de couverture pour un maximum de temps de la vie du réseau.
- Chaque point  $q \in A$  est couvert par au moins  $k$  capteurs distincts. La figure 13 illustre la notion de points  $k$ -couverts par cinq nœuds capteurs  $S_1, S_2, S_3, S_4$  et  $S_5$ .

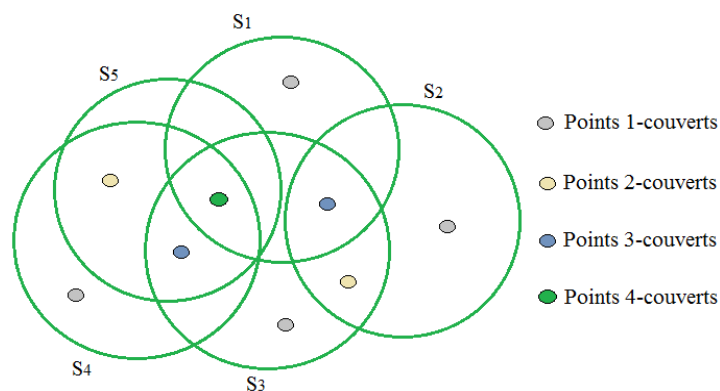


Figure 13: Illustration de points  $k$ -couvert

La couverture de zone consiste également à appliquer des stratégies d'ordonnement sur les états d'activités des nœuds capteurs (actif ou sleep) afin de décider du nombre et du choix des capteurs qui doivent être planifiés dans les modes actifs ou sleep, tout en maintenant une couverture complète ou acceptable de la zone de surveillance selon le type d'application. Pour certaines applications, un degré de couverture simple (1-couvert) ne suffit pas pour mettre en place de telles stratégies d'ordonnements. Ainsi, il est nécessaire de garantir une couverture multiple ( $k$ -couvert) lors du placement des nœuds. Dans ce cas, il peut y avoir des redondances de

couvertures dans la zone d'intérêt, c'est-à-dire, plusieurs capteurs donnés peuvent couvrir en même temps les mêmes surfaces d'une zone donnée. Par conséquent, un même événement peut être détecté et envoyé à la BS par plusieurs capteurs à la fois. Ceux qui détectent et envoient des mesures redondantes vont ainsi consommer inutilement de l'énergie dans le traitement, la transmission et la réception de ces données. Afin de réduire la consommation énergétique dans l'ensemble du réseau, il est donc nécessaire d'appliquer des stratégies d'ordonnancement efficaces sur les états d'activités des capteurs. La figure 14 illustre un exemple d'un mécanisme d'ordonnancement des états d'activités des capteurs qui permet d'optimiser la consommation énergétique dans un RCSF donné, tout en assurant la couverture complète de la zone de surveillance et une connectivité du réseau.

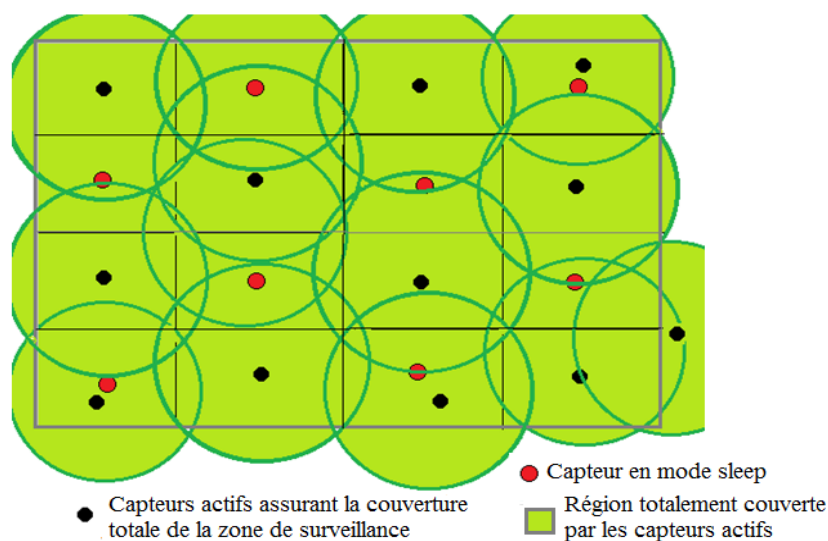


Figure 14: Couverture de zone par ordonnancement des états des capteurs

## 2.5 Connectivité dans les RCSF

Après les phases de placement/déploiements des nœuds dans la zone d'intérêt, ces derniers doivent former un réseau connecté afin de pouvoir assurer le transfert des informations capturées par des nœuds sources vers la station de base. Selon le type d'architecture utilisé, l'ensemble des nœuds du réseau ou une partie de cet ensemble doivent se connecter de façon permanente dès qu'une source donnée transmet ses données à la station de base.

### 2.5.1 Définition de la connectivité dans les RCSF

Pour définir la connectivité entre deux nœuds d'un RCSF, nous adoptons la définition présentée dans [43]. Dans cette définition, on dit que deux nœuds d'un RCSF sont connectés si et seulement si ils peuvent communiquer directement (connectivité à un saut) ou indirectement (connectivité

multi-saut). Le RCSF est connecté s'il existe au moins une route entre chaque nœud du réseau et la station de base [43]. Par conséquent, d'après ces deux définitions, nous pouvons dire que la connectivité dépend donc essentiellement de l'existence de routes. Elle est ainsi affectée par les changements de topologie dus généralement aux pannes de nœuds, à la mobilité, etc. Ces changements de topologies ont pour conséquences la perte des liens de communication, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, etc.

A l'instar de la couverture, la connectivité dans les RCSF est considérée comme un paramètre de mesure de performance très important surtout dans le cas des applications de RCSF citées ci-haut. Ainsi, pour bien garantir toutes les fonctionnalités de telles applications, il est nécessaire de bien étudier et de prendre en compte les propriétés de connectivité lors de la conception et le déploiement de tels réseaux.

### **2.5.2 Types de connectivité dans les RCSF**

Il existe deux types de connectivité dans les RCSF qui sont la connectivité complète et la connectivité intermittente [43]. Une connectivité complète peut être soit simple (1-connectivité), soit multiple (k-connectivité). Une connectivité complète d'un RCSF est dite simple s'il existe un seul chemin entre chaque nœud source et la station de base et elle est dite multiple s'il existe plusieurs chemins distincts entre chaque nœud source et la station de base. Selon les stratégies de placement des nœuds dans la zone de surveillance et selon les caractéristiques de l'application, une connectivité simple (ou multiple) peut être assurée lors de la phase de placement des nœuds ou bien être obtenue lors d'une phase de redéploiement ou d'auto-configuration des nœuds.

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

### **2.6 Routage dans les RCSF**

Le routage est l'une des fonctions les plus importantes dans un réseau de communication en général et dans les RCSF en particulier [80]. Cette fonction permet aux nœuds de faire la propagation des données capturées entre sources et destinations. Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil est généralement un routage multi-sauts du fait que les nœuds capteurs ont de faibles capacités de communications, de traitements et de calculs (faibles puissances d'émissions, faibles capacités de calculs, etc.). La transmission des informations d'une source vers une destination finale (qui est

généralement le centre de traitement) se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud consomme de l'énergie soit pour transmettre ses données, soit pour relayer les données à d'autres nœuds. Dans ce contexte, une politique de routage qui ne tient pas en compte des problématiques de gestion de l'énergie des nœuds capteurs peut avoir des conséquences très néfastes sur la consommation énergétique de ces derniers, et donc sur la durée de vie du RCSF. Par conséquent, une bonne politique de routage adaptée dans les RCSF doit prendre en considération toutes les caractéristiques des capteurs (consommation énergétique, fiabilité, etc.) afin d'assurer les meilleures performances du système selon le type d'application. Les propriétés de couverture de la zone de surveillance, ainsi que celles de la connectivité du réseau doivent également être prises en considération dans la conception et la mise en œuvre d'une bonne politique de routage pour plusieurs applications de RCSF.

Plusieurs algorithmes ont été développés pour le routage dans les réseaux MANET. Cependant, le routage dans les RCSF diffère de celui utilisé dans les MANET par les caractéristiques suivantes [80] :

- il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour un grand nombre de nœuds dans le cas des RCSF;
- beaucoup d'applications des RCSF exigent généralement l'envoi des données capturées de sources multiples à un nœud particulier qui est le centre de traitement;
- les multiples capteurs peuvent produire les mêmes mesures à proximité d'un phénomène surveillé (mesures redondantes);
- les nœuds capteurs ont des contraintes de ressources matérielles telle que l'énergie et exigent ainsi une gestion très rigoureuse de ces ressources.

Ainsi, en raison de ces différences, plusieurs algorithmes ont été proposés pour le routage dans les RCSF. Dans la plupart de ces propositions, les stratégies utilisées peuvent être classifiées selon la topologie du réseau (plate ou hiérarchique) et selon le type d'application. Par conséquent, pour assurer une bonne politique de routage dans les RCSF, les considérations suivantes doivent être prises en compte :

- contraintes énergétiques : toutes les couches doivent tenir compte de la limitation d'énergie des capteurs dans le but de pouvoir optimiser la durée de vie du réseau ;
- bande passante limitée ;
- absence d'adressage global;
- redondance des données;
- réseau à sources multiples et destination unique;

- gestion des ressources;
- capacités de stockage limitées;
- capacités de calcul limitées.

Nous allons présenter respectivement dans les sections 2.6.1 et 2.6.2 un certain nombre de protocoles de routage qui sont parmi les plus utilisés dans les RCSF.

## **2.6.1 Protocoles de routage à plat**

### **2.6.1.1 SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation)**

SPIN est l'un des premiers protocoles de routage basé sur une négociation qui a été proposé par Heinzelman et al. [16]. Le principal but de ce protocole est de résoudre le problème d'inondation causée généralement à la duplication inutile des réceptions d'une même donnée et à la redondance de couverture liée au déploiement dense des capteurs. En effet, en utilisant l'inondation, les capteurs qui ont des zones de couverture qui se chevauchent vont émettre des mesures similaires ou presque identiques. Ce phénomène cause généralement des dépenses inutiles d'énergie durant les phases de TX/RX et affecte grandement les performances du réseau surtout la durée de vie de ce dernier. Afin de résoudre de tels problèmes, SPIN adopte les deux principes : la négociation et l'adaptation aux ressources.

La négociation permet aux nœuds capteurs d'éviter le problème d'implosion. Pour ce faire, chaque émission d'une information donnée est précédée par la description de cette dernière en utilisant le concept de méta donnée. Ainsi, le récepteur pourra accepter ou non la donnée envoyée en se basant sur sa description.

L'adaptation aux ressources permet aux nœuds capteurs de contrôler leurs niveaux d'énergie continuellement. Ainsi, le protocole peut adapter l'état de chaque nœud capteur (TX, RX, ou sleep) en fonction de son énergie résiduelle. Cependant, SPIN a comme inconvénient majeur d'être un protocole non évolutif.

### **2.6.1.2 DD (Directed Diffusion)**

DD [18, 19] est un protocole de routage de propagation de données, permettant d'utiliser plusieurs chemins. DD est basé sur le principe de fonctionnement suivant : c'est la station de base qui diffuse un message d'intérêt à tous les nœuds capteurs afin d'interroger le réseau sur une donnée bien déterminée. Cette demande est acquittée par un paquet de réponse appelé gradient qui est un lien de réponse de la part du nœud. Ainsi, en utilisant ce mécanisme, une multitude de chemins peuvent être établis entre une source donnée et la station de base. L'un des chemins est alors sélectionné par

renforcement et si ce dernier échoue, alors un autre chemin doit être établi. Dans le cas d'une panne d'un chemin (perte de paquet, débit réduit, etc.), alors la station de base peut envoyer un renforcement négatif sur le chemin en panne en spécifiant le débit de base et en prenant comme alternative le renforcement positif d'un autre chemin.

### **2.6.1.3 RR (Rumour Routing)**

RR [20] est une variante du protocole DD qui essaie de trouver un compromis entre l'inondation des intérêts et la propagation des données. En effet, dans DD, les nœuds inondent généralement le réseau par la diffusion des intérêts, alors que dans le cas de certaines applications des RCSF, seule une petite quantité de données est demandée par la station de base. Le protocole RR permet d'éviter ce problème d'inondation en routant les données uniquement aux nœuds qui ont capturé un événement particulier. Pour ce faire, il utilise le concept d'agent qui est un paquet avec un grand TTL (Time To Live) traversant le réseau pour informer l'ensemble des nœuds des événements qu'il a rencontrés tout au long de son parcours sur le réseau. Ainsi, chaque nœud maintient une table de relais locale contenant le prochain sauts vers la station de base et une métrique qui représente le nombre de saut vers chaque nœud relais. Lorsqu'un nœud détecte un nouvel événement, il l'ajoute ainsi dans sa table locale et crée ensuite un nouvel agent en se basant sur une certaine probabilité.

### **2.6.1.4 Cougar**

Dans le protocole Cougar [21], le réseau est vu comme une base de données distribuée et les données capturées par les nœuds sont modélisées comme une table relationnelle. Dans cette table, chacun des attributs représente soit des informations sur le nœud capteur ou bien des données produites par ce nœud. Afin de manipuler les tables de la base de données distribuée au niveau de la station de base, Cougar fournit une interface de gestion et de manipulation des données similaire à l'interface de SQL. Cette interface permet à la station de base d'interroger le réseau sur une information particulière. Notons que Cougar fournit également aux nœuds capteurs un mécanisme pour une agrégation partielle des données.

## **2.6.2 Protocoles de routage hiérarchique**

### **2.6.2.1 LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)**

LEACH [22] est un protocole de routage hiérarchique basé sur le principe du "clustering" dans lequel les nœuds du réseau sont structurés suivant deux niveaux: les Cluster-Head (CH) et les nœuds membres. LEACH est un protocole de routage réparti, proactif et dynamique. Les CH sont choisis aléatoirement selon une politique de gestion round-robin afin de garantir un équilibrage de la consommation énergétique entre les différents nœuds du réseau. Notons également, que dans



LEACH, les CH peuvent agréger les données reçues de plusieurs nœuds membres afin de réduire la quantité de données transmises à la station de base. Dans LEACH, chaque round est composé d'une phase de construction et d'une phase de communication. Dans la phase de construction, les CH sont élus et une politique d'accès au médium est établie au sein de chaque groupe. Cette phase démarre par une prise de décision locale au niveau de chaque nœud afin de devenir CH ou membre. Pour ce faire, chaque nœud capteur  $S_i$  du réseau va choisir un nombre aléatoire ; et si ce nombre est inférieur à une valeur donnée  $T(S_i)$ , alors le nœud en question devient CH. L'équation suivante permet de définir la valeur de  $T(S_i)$ .

$$\begin{cases} T(S_i) = \frac{p}{1 - p * \text{rmod}\left(\frac{1}{p}\right)} & \text{si } p \in G \\ T(S_i) = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.2)$$

Avec  $p$  représentant le pourcentage désiré de CH pendant un numéro de round  $r$ ,  $G$  représente l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élus CH pendant les  $1/p$  rounds précédents.

Après cette phase de construction, chaque nœud qui est élu CH va émettre un message de notification afin de permettre aux nœuds non CH de décider l'appartenance ou non à son cluster. Cette décision d'appartenance à un cluster est basée sur l'amplitude du signal reçu. En faisant ainsi, le CH ayant le signal le plus fort est choisi, c'est-à-dire, le plus proche pour un nœud donné. En cas d'égalité, un chef aléatoire est choisi.

Durant la phase de communication, les nœuds membres peuvent émettre leurs données capturées en utilisant un ordonnancement avec des slots TDMA. Cette technique de transmission permet ainsi aux nœuds membres d'éteindre leur radio en dehors de leurs slots réservés dans le but d'économiser leur énergie. Les communications entre les nœuds CH et la station de base se font d'une manière directe. Ainsi, les CH qui doivent émettre doivent adapter leurs émetteurs radio afin d'atteindre directement la station de base. Cependant, notons que le principal inconvénient de LEACH est que les CH envoient directement les données vers la station de base, ce qui peut engendrer une forte consommation énergétique pour ces CH.

### 2.6.2.2 PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

PEGASIS est une version améliorée de LEACH qui a été proposée par Lindsey et al. [23]. La principale idée du protocole PEGASIS est de former une chaîne entre les différents nœuds capteurs

de sorte que chaque nœud capteur peut transmettre et recevoir à un voisin proche. Les données collectées sont transmises d'un nœud capteur à un autre qui se chargera à son tour de les agréger, puis de les relayer jusqu'à ce qu'elles arrivent à la station de base. Un mécanisme de sélection par rotation basé sur l'algorithme round-robin est mis en œuvre pour l'ensemble des nœuds capteurs qui doivent transmettre les données à la station de base afin de réduire l'énergie moyenne dissipée par un nœud donné durant une période (round). Contrairement à LEACH, PEGASIS évite la formation des clusters et procure à un seul nœud dans la chaîne l'envoi de données à la station de base.

PEGASIS est adapté seulement aux architectures de RCSF avec des nœuds capteurs fixes. Ainsi, son utilisation dans des architectures comportant des nœuds capteurs mobiles pourrait dégrader considérablement ses performances.

Un autre protocole de routage centralisé appelé Hierarchical PEGASIS [24] a été conçu afin d'améliorer le protocole PEGASIS. Dans ce protocole, la chaîne est divisée en groupes de sorte que chaque nœud capteur communique avec un seul nœud voisin de niveau plus bas de la hiérarchie. Les transmissions simultanées en parallèle dans des groupes différents minimisent ainsi les délais de transmission.

### **2.6.2.3 TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)**

Manjeshwar et Agrawal [25] ont proposé TEEN qui est également un protocole de routage basé sur le clustering et semblable au protocole LEACH. C'est un protocole de routage qui est adapté aux applications critiques où le changement de certains paramètres peut être brusque. Dans ce protocole, le réseau est hiérarchisé en plusieurs niveaux dans lesquels les nœuds les plus proches forment des clusters.

Ensuite, le processus de clustering passe au second niveau et ainsi de suite jusqu'à ce que la station de base soit atteinte. Après la phase de formation des clusters, chaque CH transmet à ses nœuds membres un seuil (Hard HT, Hard Threshold) représentant le seuil du paramètre surveillé par les capteurs et un autre seuil (Soft ST, Soft Threshold) représentant une petite variation de la valeur du paramètre surveillé. Ainsi, dès qu'un nœud se rend compte que la valeur qu'il a capturée a dépassé le seuil HT, alors il doit émettre un rapport à son CH. Il n'émettra un nouveau rapport que si la valeur du paramètre surveillé change radicalement, autrement dit, dès que la différence dépasse ST. Ce mécanisme permet donc de mettre en œuvre un comportement réactif, tout en limitant le nombre de messages utilisés.

#### 2.6.2.4 APTEEN (Adaptive TEEN)

APTEEN est un protocole hybride qui étend le protocole TEEN en permettant de palier aux limitations de ce dernier. Il est proposé par Manjeshwar et al. [26]. APTEEN permet de changer la périodicité et les valeurs seuils utilisées dans TEEN selon les besoins de l'utilisateur et le type d'application. Dans ce protocole, les CH transmettent à leurs membres l'ensemble de paramètres physiques que l'utilisateur a besoin afin d'obtenir des informations sur le RCSF. Les seuils HT, ST, les "schedule" TDMA, ainsi qu'un compteur de temps (qui mesure la période entre deux transmissions successives d'un nœud capteur donné) sont également transmis par chaque CH à l'ensemble de ses nœuds membres. APTEEN offre une grande flexibilité qui permet à l'utilisateur de choisir les valeurs seuils HT, ST et l'intervalle pour les compteurs de temps afin que la consommation énergétique des nœuds soit contrôlée par la variation de ces paramètres.

Cependant, APTEEN nécessite une complexité supplémentaire pour l'implémentation des fonctions seuils et des compteurs de temps.

#### 2.6.2.5 HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering)

HEED est un protocole de clustering distribué pour les RCSF proposé par Younes et Fahmy [27]. Par opposition aux techniques de routages précédentes, HEED ne fait aucune restriction sur la distribution et la densité des nœuds et ne dépend ni de la topologie du réseau, ni de sa taille mais il suppose que les capteurs ont la possibilité d'ajuster leurs puissances de transmission. Dans HEED, les CH sont élus en fonction des critères tels que l'énergie résiduelle et le degré des nœuds. Il vise ainsi à réaliser une distribution uniforme des CH dans le réseau. Ce protocole vise également à générer des clusters de taille équilibré afin de garantir la connectivité du graphe formé par l'ensemble des CH. L'élection d'un nœud  $S_i$  comme CH se fait avec une probabilité  $P_{CH}$  égale à :

$$P_{CH} = C_{prob} * \frac{E_R(S_i)}{E_{Total}} \quad (2.3)$$

où  $E_R(S_i)$ , et  $E_{Total}$  représentent respectivement l'énergie résiduelle du nœud  $S_i$ , le nombre optimal de clusters et l'énergie totale dans le RCSF.

Toutefois, il est difficile d'évaluer  $E_{Total}$  à cause de l'approche distribuée (absence de toute commande centrale). Une autre difficulté dans HEED réside également dans la détermination du

nombre optimal de clusters. De plus, HEED ne précise pas l'utilisation d'un protocole particulier pour assurer la communication entre les CH et la station de base.

#### **2.6.2.6 SAR (Sensor Aggregates Routing)**

SAR, proposé par Fang et al. [28] est une autre approche de clustering basé sur la localisation et qui permet l'agrégation des données dans des RCSF surveillant plusieurs cibles. Ces cibles peuvent être fixes ou mobiles à tout moment indépendamment des états des uns et des autres. Ce protocole a pour objectif de déterminer à tout moment le nombre de cibles et les localisations approximatives des clusters associés permettant ainsi de surveiller les déplacements de ces cibles dans une zone d'intérêt donnée. Pour ce faire, les nœuds capteurs étudient les caractéristiques spatiales des signaux associés aux cibles. Ainsi, lorsque plusieurs nœuds proches surveillent des cibles données, alors ils sont regroupés en clusters selon leurs proximités avec ces dernières et de sorte qu'il y ait un seul pic par cluster. Un pic pourrait représenter une cible, plusieurs cibles proches ou aucune cible (dans le cas où il serait produit par les atténuations du signal). Le mécanisme d'élection des CH se fait dans un voisinage à un seul saut et le nœud ayant le plus grand niveau de signal parmi ses voisins à un saut va se déclarer CH.

#### **2.6.3 Comparaison des protocoles de routage de RCSF**

Dans le tableau 1, nous faisons une synthèse des différents protocoles de routage présentés ci-dessous en comparant leur famille d'appartenance (plat ou hiérarchique), leurs avantages majeurs et leurs principaux inconvénients.

Tableau 1 : Comparaison des protocoles de routage de RCSF

<b>Caractéristiques</b> <b>Protocole de routage</b>	<b>Famille</b> <b>(Plat ou Hiérarchique)</b>	<b>Avantages majeurs</b>	<b>Inconvénients majeurs</b>
<b>SPIN</b>	Plat	-Évite le problème d'implosion -Adaptation aux ressources	- Non évolutif
<b>DD</b>	Plat	-Assure la robustesse dans le routage	- Inondations fréquentes dans le réseau dues aux diffusions des intérêts
<b>RR</b>	Plat	-Permet de résoudre le problème d'inondation	- Problèmes d'adaptation dans le cas d'applications de RCSF qui génèrent un grand nombre d'événements
<b>Cougar</b>	Plat	-Fournit une interface pour la gestion et l'interrogation du RCSF	-Complexité due à l'interface de gestion -Nécessite des mécanismes de synchronisation entre capteurs
<b>LEACH</b>	Hiérarchique	-Optimisation et équilibrage de la consommation énergétique dans le réseau	-Forte consommation énergétique pour les CH -Problèmes de passage à l'échelle
<b>PEGASIS</b>	Hiérarchique	-Évite la formation de clusters multiples, ce qui optimise la durée de vie du réseau	-Problèmes d'adaptation à des capteurs mobiles
<b>TEEN</b>	Hiérarchique	-Adapté à des applications critiques avec changements de paramètres brusques	-Périodicité et seuils (ST, HT) non paramétrables par l'utilisateur -Complexités de formations des clusters
<b>APTEEN</b>	Hiérarchique	-Flexibilité due au fait que l'utilisateur peut paramétrer les seuils et la périodicité	-Complexités de formations des clusters -« Overhead » plus important
<b>HEED</b>	Hiérarchique	-Équilibrage de la taille des clusters -Évolutif	-Ne précise aucun protocole de communication entre CH et BS
<b>SAR</b>	Hiérarchique	-Adapté à des RCSF surveillant plusieurs cibles (fixes ou mobiles)	-Chaque capteur doit avoir une connaissance géographique du réseau

## **2.7 Techniques de conservation énergétique dans les RCSF**

Les techniques de conservation énergétique dans les RCSF et leurs classifications ont toujours attiré l'attention de plusieurs chercheurs. Ces techniques de conservation permettent généralement la mise en œuvre d'approches qui peuvent optimiser la consommation énergétique des capteurs selon leurs modes d'activités (actif, TX, RX ou sleep).

L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes de capture, de traitement et de communication [34].

### **2.7.1 L'énergie de capture**

L'énergie de capture est la partie énergétique dépensée par un nœud capteur lorsque celui-ci effectue les opérations d'échantillonnage, de conversion analogique/numérique et d'activation de son module de capture. Le coût de cette énergie dépend du type spécifique du capteur (image, son, température, etc.) et des opérations précédentes. Cette énergie est en général très faible par rapport à la quantité énergétique totale consommée par un nœud capteur donné.

### **2.7.2 L'énergie de traitement**

L'énergie de traitement d'un nœud capteur représente la quantité énergétique dépensée par celui-ci pendant les opérations de lecture et d'écriture en mémoire. Cette énergie est scindée en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel. L'énergie de fuite représente l'énergie dissipée lorsque le processeur n'effectue aucun traitement. L'énergie de traitement est relativement faible par rapport à l'énergie dépensée durant la communication.

### **2.7.3 L'énergie de communication**

L'énergie de communication d'un nœud capteur est divisée en deux parties : l'énergie dépensée durant la transmission de données (TX) et celle dépensée pendant la réception de données (RX). Cette énergie dépend non seulement de la quantité des données à transmettre (taille des paquets) mais également de la distance entre l'émetteur et le récepteur et le type du module de communication utilisé. En effet, la portée d'un signal dépend non seulement de sa puissance d'émission (TX power) mais également des propriétés physiques du milieu de propagation. Cependant, la puissance d'émission influe grandement sur la portée du signal. Ainsi, lorsque la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée, et par conséquent l'énergie consommée sera plus importante. L'énergie de communication représente la plus grande partie de l'énergie consommée par un nœud capteur.

## 2.8 Classification des techniques de conservation énergétique

Plusieurs classifications des techniques de conservation d'énergie ont été proposées dans la littérature. Ilyas et Mahgoub ont proposé dans [37] l'une des principales classifications de ces techniques de conservation d'énergie. Cette classification est illustrée sur la figure 11.

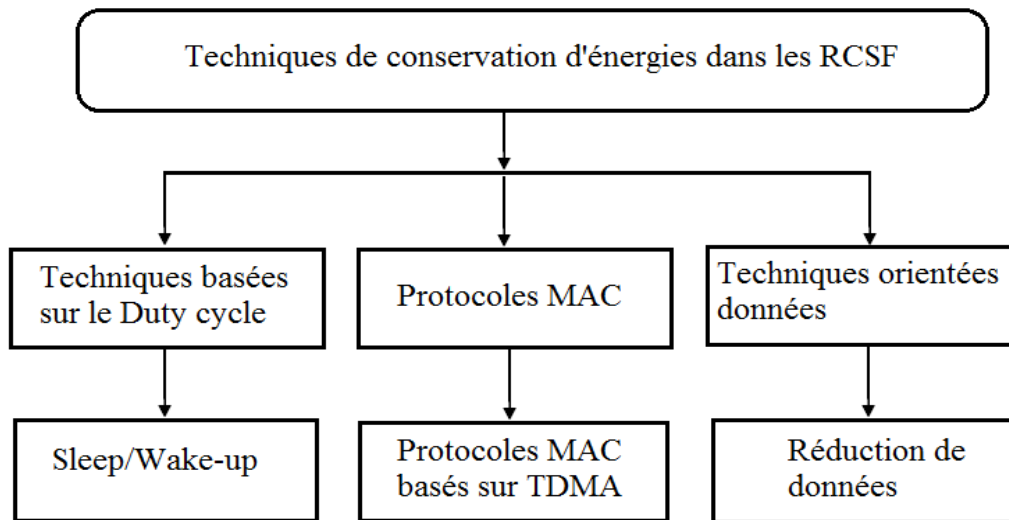


Figure 15: Classification des techniques de conservation d'énergie dans les RCSF [37]

Comme le montre la figure 11, les techniques de conservation d'énergie dans les RCSF peuvent être classées en trois grandes familles qui sont les protocoles MAC basés sur les techniques de "duty cycle" (sleep/wake-up), les protocoles MAC basés sur TDMA et les techniques orientées données. Notons également que d'autres protocoles MAC hybrides combinant des techniques d'accès TDMA et CDMA ont été développés pour les RCSF. Nous allons décrire dans la section suivante les différents protocoles de conservation d'énergie qui sont basés respectivement sur les techniques de duty cycle, sur TDMA, sur des approches hybrides ainsi que sur les techniques de réduction de données.

### 2.8.1 Protocoles MAC basés sur le "duty cycle"

Dans les protocoles MAC basés sur les techniques de duty cycle, chaque nœud capteur alterne entre des périodes actives (radio ON) et des périodes inactives (radio OFF ou mode sleep) afin de conserver son énergie. Le duty cycle est ainsi définie comme étant la proportion de la période active sur la durée totale d'un cycle (période active + période inactive). Donc, il est évident qu'un duty cycle faible permet aux nœuds de consommer moins énergie. Par conséquent, dans ces approches, on cherche à minimiser le duty cycle tout en garantissant le bon fonctionnement du RCSF. Plusieurs protocoles MAC que nous présenterons dans la suite de ce chapitre sont proposés dans ce sens.

### **2.8.2 Protocoles MAC basés sur TDMA**

Les protocoles MAC basés sur TDMA ont été aussi proposés dans le but de réduire la consommation énergétique dans les RCSF. Dans ces protocoles implémentés généralement dans les architectures centralisées, le temps est divisé en trames et ce dernier est composé d'un certain nombre de temps élémentaires appelés slots de temps ("slots time" en Anglais). Ensuite, une politique d'ordonnancement permettant d'allouer à chaque nœud capteur plusieurs slots time par trame est mise en œuvre. Avec l'allocation de ces slots time, chaque nœud peut ainsi connaître le début de sa transmission pour une trame donnée et la durée de cette transmission vers un ou plusieurs nœuds récepteurs. Chaque nœud utilise également l'allocation de ses slots time pour la réception des données qui lui sont destinées. Dans la majeure partie des cas, un coordonnateur doit se charger de la centralisation et de la coordination dans le réseau. Il est ainsi chargé de la distribution des slots time entre les différents nœuds qu'il gère. Ces protocoles basés TDMA sont efficaces en termes de consommation énergétique dans la mesure où le module radio d'un nœud donné n'est allumé que durant ses propres slots time, et éteint en dehors de ses slots time. Cependant, ces protocoles ont un certain nombre de limites dues le plus souvent aux aspects dynamiques du RCSF tels que les variations temporelles du canal de transmission, les défaillances de certains nœuds capteurs qui ont épuisé leur énergie, etc.

### **2.8.3 Protocoles MAC hybrides**

D'autres protocoles MAC hybrides combinant CSMA et TDMA ont aussi été développés pour les RCSF. En plus de la réduction de la consommation énergétique des capteurs, l'autre avantage des protocoles MAC hybrides est surtout la réduction des interférences entre nœuds capteurs voisins. Ainsi, les nœuds peuvent se synchroniser pour accéder au canal sans problème de contention. Cependant, le principal inconvénient de ces protocoles demeure leur complexité.

### **2.8.4 Techniques de réduction de données**

Dans la plupart des techniques de conservation d'énergie présentées précédemment, la consommation énergétique des capteurs dues aux opérations de détections n'est généralement pas prise en compte, alors celle-ci influe sur la consommation énergétique globale d'un nœud capteur donné et donc du RCSF. Les techniques orientées données sont conçues afin de réduire d'avantage la consommation énergétique. Par conséquent, des approches orientées données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité en terme de consommation énergétique dans les RCSF. En effet, avec le déploiement généralement dense des nœuds capteurs, on note des chevauchements de couverture de détections. Les mesures prélevées par plusieurs capteurs voisins peuvent être corrélées



spatialement et/ou temporellement. Avec les techniques orientées données basées sur des techniques d'agrégation, des mécanismes de réductions de données peuvent être utilisés afin de réduire la quantité de données destinée à la station de base, ce qui permet ainsi de réduire la consommation énergétique dans le réseau.

### 2.8.5 Comparaison des techniques de conservation énergétique

Dans le tableau 2, nous résumons les caractéristiques des différentes approches de conservation d'énergie les comparant en termes d'avantages et d'inconvénients.

*Tableau 2 : Comparaison des approches de conservation d'énergie dans les RCSF*

<b>Caractéristiques Technique de conservation d'énergie</b>	<b>Approches utilisées</b>	<b>Avantages majeurs</b>	<b>Inconvénients majeurs</b>
<b>Techniques de duty cycle</b>	Alternance entre périodes actives et inactives pour conserver l'énergie	-Efficace en termes de consommation énergétique	- Nécessitent des mécanismes de synchronisations des nœuds lors des phases de TX/RX -Collisions fréquentes dans le réseau
<b>Protocoles MAC basés sur TDMA</b>	Politique d'ordonnancement par allocation de time slots	-Efficaces en termes de consommation énergétique	- Complexes dans mise en œuvre -Problèmes d'adaptation dans le cas de variations temporelles du canal
<b>Protocoles MAC hybrides</b>	Techniques combinant CSMA et TDMA	-Efficaces en termes de consommation énergétique -Permet de réduire les interférences inter-nœuds	- Plus complexes à mettre en œuvre
<b>Techniques de réduction de données</b>	Techniques d'agrégation et de compression des données	-Efficaces en termes de consommation énergétique -Adaptées dans le cas de topologies avec redondances de couvertures	-« Overhead » plus important

### 2.9 Techniques orientées « placement des nœuds, couverture et/ou connectivité »

Plusieurs techniques de placement des nœuds capteurs qui visent à optimiser la couverture, la

connectivité et/ou la durée de vie du réseau sont proposées. Ces techniques peuvent être classées en deux familles qui sont les techniques basées sur des calculs géométriques et celles basées sur des grilles.

### **2.9.1 Techniques de placement des nœuds basées sur des calculs géométriques**

Akewar et al. [48] ont présenté une étude détaillée sur différentes stratégies de déploiement des nœuds capteurs dans les RCSF. Ces stratégies basées sur des méthodes de calculs de la géométrie algorithmique constituent une bonne référence et une vue d'ensemble sur les problématiques de couverture et de connectivité dans les RCSF. Toutefois, ils n'ont pas intégré les problématiques de la durée de vie dans leur étude, alors que cette dernière est étroitement liée aux autres problématiques de couverture et de connectivité.

Khasteh et al. [51] ont travaillé sur les stratégies de placement des nœuds dans le but d'optimiser la consommation énergétique dans le réseau, et de garantir de bonnes propriétés de couverture et de connectivité. Ils ont ainsi proposé une nouvelle approche de conservation d'énergie intégrée aux problèmes de couverture et de connectivité. Cette approche basée sur un déploiement déterministe des nœuds capteurs dans une zone d'intérêt supposée convexe a permis de déterminer la relation qui lie la couverture complète de la zone d'intérêt et la connectivité du réseau. Cette relation qui lie le rayon de communication de chaque capteur  $R_c$  et son rayon de détection  $R_s$  est une condition suffisante pour que la couverture complète implique la connectivité.

Dans le même sens que les auteurs précédents, Wang et al. [52] ont montré que la 1-couverture d'une région convexe est suffisante pour garantir la 1-connectivité du réseau si et seulement si, le rayon de communication  $R_c$  de chaque capteur est au moins égal à deux fois son rayon de détection  $R_s$ , c'est-à-dire,  $R_c \geq 2R_s$ . Soulignons toutefois que la problématique de la durée de vie du réseau n'est pas considérée dans leur étude.

### **2.9.2 Techniques de placement des nœuds basées sur des grilles**

Dans le but d'optimiser la couverture d'une zone de surveillance donnée, Pompili et al. [53] ont proposé une méthode de placement des nœuds capteurs basée sur des grilles triangulaires. Avec leur méthode de placement, la couverture peut être contrôlée en ajustant la distance entre deux nœuds capteurs adjacents notée „ $d$ “. Ils ont ainsi montré qu'une couverture de 100% est atteinte dans le cas où  $d = r\sqrt{3}$ , avec  $r$  représentant le rayon de détection des capteurs. Cependant, le principal objectif de leur proposition est d'atteindre une couverture totale de la zone de surveillance. Par conséquent,

les problématiques de connectivité et celles de durée de vie du réseau ne sont pas prises en compte dans leur proposition.

Halder et al. [54] ont proposé une stratégie pré-déterministe de déploiement non uniforme des nœuds capteurs basée sur des cellules hexagonales. Le but de leur stratégie est d'équilibrer la consommation énergétique entre les couches, afin de prolonger la durée de vie du réseau, tout en maintenant la couverture de la zone et la connectivité du réseau. Pour ce faire, ils ont considéré une architecture dans laquelle la zone de couverture du réseau est divisée en couches dont chacune contient deux types de cellules régulières (cellules primaires et cellules secondaires). Ensuite, ils planifient le déploiement des nœuds capteurs en deux phases. Lors de la première phase, le but est d'assurer la couverture et la connectivité du réseau. Dans la seconde phase, des nœuds redondants classés par priorité sont placés au niveau des frontières séparant deux couches adjacentes, afin de renforcer la couverture et la connectivité dans le cas où certains nœuds déployés dans la première phase ne participaient plus à la détection ou au routage. Ainsi, cette stratégie de déploiement permet d'assurer une couverture de la zone et une connectivité du réseau permettant de garantir un routage efficace. Toutefois, les nœuds placés au niveau des frontières consomment plus d'énergie à cause de leur participation très fréquente au routage.

## **2.10 Techniques orientées « optimisation multi-objectif sous contraintes »**

Afin d'intégrer la couverture, la connectivité et l'optimisation de la consommation énergétique dans un même modèle de résolution, un certain nombre d'approches basées sur une formalisation du problème sous forme d'une fonction multi-objectif avec contraintes, ont été également proposées dans la littérature. Un tel problème modélisé sous forme d'une fonction multi-objectif avec des contraintes est généralement prouvé comme étant un problème NP-complet. En effet, les problèmes d'optimisation sont répartis selon leurs difficultés en trois classes notées respectivement P, NP et NP-complet [83]. Un problème est de classe :

- P, si l'algorithme pour le résoudre s'exécute en un temps polynomial, c'est-à-dire, si le nombre d'opérations est toujours plus petit qu'une puissance du nombre des données ;
- NP, si toute solution proposée peut être vérifiée en un temps polynomial ;
- NP-complet, si l'on savait résoudre un problème NP-complet en un temps polynomial alors on saurait résoudre tous les problèmes NP en un temps polynomial.

Les temps polynomial ont des complexités de l'ordre  $\log(n)$ ,  $n$  ou  $n^2$  et sont réputés être efficaces

par rapport aux temps non polynomial qui sont généralement de l'ordre  $2^n$  ou  $n!$  et sont réputés non efficaces.

Plusieurs techniques basées sur des méthodes d'optimisation telles que des algorithmes génétiques [57], des algorithmes mémétiques [58], des heuristiques et des méta-heuristiques [59], des techniques de génération de colonnes [60], ont été proposées pour la résolution de problèmes d'optimisation NP-complet dans les RCSF. Nous allons présenter dans les paragraphes suivants certaines de ces solutions.

Rossi et al. [62] ont proposé un algorithme efficace de génération de colonne basé sur les algorithmes génétiques afin de résoudre le problème de couverture de cibles et celui de la maximisation de la durée de vie dans les RCSF. En utilisant des nœuds capteurs directionnels, ils ont modélisé le problème de maximisation de la durée de vie du réseau pour deux scénarios : les capteurs utilisant des directions de détections prédéfinis (fixes) et ceux utilisant des directions de détections contextuelles (ajustables). Pour résoudre ce problème qui est NP-complet, ils ont couplé un algorithme hybride de génération de colonne et un algorithme génétique afin de trouver une solution optimale. Ils ont ainsi montré à travers des simulations que l'adressage du problème dans le scénario où les capteurs ont des directions contextuelles donne de meilleures performances en terme de maximisation de durée de vie du réseau. Toutefois, les problématiques de placement des nœuds et celles de connectivité optimale du réseau ne sont pas prises en compte dans leur modèle.

D'autres auteurs comme Chen et al. [63] ont proposé un algorithme génétique hybride basé sur les opérations de base des algorithmes génétiques, combinés avec des stratégies de recherches locales. Ces méthodes hybrides permettent de diviser l'ensemble des capteurs du réseau en un nombre maximum de couverture disjointes qui peuvent couvrir chacune toutes les cibles. Le but de leur algorithme est de pouvoir résoudre le problème qui est NP-complet par une technique de détection de couverture complète et une commutation périodique de ces couvertures disjointes. Ainsi, avec une telle approche, la durée de vie du réseau peut être nettement améliorée. Cependant, à l'instar des auteurs dans [62], les problématiques liées au placement des nœuds et celles de la connectivité du réseau ne sont pas intégrées dans le modèle de ces auteurs.

Ting et al. [64] ont proposé une approche basée sur un algorithme mémétique combinant un algorithme génétique et le schéma local de Lamarck afin d'étendre la durée de vie dans les RCSF. Dans cette approche, les auteurs considèrent la disposition des capteurs comme étant un processus de collecte de couvertures plutôt que d'un partitionnement. Les chromosomes de l'algorithme

mémétique sont représentés sous forme d'une collection ordonnée de couvertures dans laquelle chaque capteur doit y contribuer. Cette méthode permet ainsi de diviser l'ensemble des capteurs du réseau en plusieurs couvertures dont chacune peut couvrir toutes les cibles. Ensuite, ces couvertures sont activées une par une afin d'optimiser la durée de vie du réseau. Ils ont modélisé le problème sous forme d'un problème k-couvert qui est NP-complet. Leur proposition a ainsi permis de résoudre ce problème k-couvert. Toutefois, leur proposition a surtout des limites en termes de connectivité optimale du réseau, ce qui peut avoir des conséquences sur l'efficacité du routage.

Chamam and Pierre ont proposé dans [66] une heuristique centralisée qui permet de calculer dynamiquement un ensemble presque-optimal de capteurs qui permettent de garantir un taux de couverture prédéfini, tout en assurant la connectivité du réseau dans le cas où le rayon de communication de chaque capteur est supérieur ou égal au double de son rayon de détection. Cependant, notons qu'une couverture à 100% de la zone de surveillance n'est pas toujours garantie par leur proposition.

Cerulli et al. [67] ont proposé une technique heuristique pour la maximisation de la durée de vie dans les RCSF en utilisant des capteurs avec des rayons de communication ajustables. Ils ont mis en place une approche basée sur une technique de génération de colonne et une heuristique incorporée dans un schéma de recherche local. Cette approche est testée dans deux scénarios différents : le cas où les rayons de communications des capteurs peuvent être ajustés en fonction de plusieurs niveaux de puissances différentes, et le cas où les rayons de communications des capteurs sont fixes. Ils ont ainsi montré que dans le scénario où les capteurs ont des puissances ajustables, les performances en terme de durée de vie sont supérieures au scénario où ils ont des puissances fixes (le cas classique). Notons toutefois que, les capteurs qui utilisent des puissances d'émission ajustables peuvent causer plus d'interférences dans leurs voisinages à cause des variations de leurs signaux.

D'autres auteurs comme Panag et al. [68] ont proposé une nouvelle méthode de recherche heuristique afin de trouver un nombre maximum d'ensembles de capteurs disjoints qui couvrent totalement une zone de surveillance donnée. Pour ce faire, ils ont mis en place un algorithme qui permet d'appliquer un ensemble d'heuristiques afin d'explorer l'espace de solutions. Ainsi, avec cette méthode, la meilleure solution explorée par la population est enregistrée et est continuellement mise à jour. Ils ont par ailleurs, montré à travers des tests faits sur des applications nécessitant plusieurs points de couvertures, que les performances de leurs propositions en terme d'optimalité de la solution dépassent d'autres propositions existantes.

## 2.11 Protocoles MAC basés sur le duty cycle

Toujours dans le contexte d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF, plusieurs protocoles MAC efficaces en énergie, basés sur des techniques de duty cycle, ont été proposés. Dans ces techniques de duty cycle, chaque nœud capteur commute régulièrement entre une période active (radio allumée) et une période inactive (radio éteinte) afin d'économiser son énergie. Nous allons présenter dans les paragraphes suivants les principaux protocoles MAC qui ont été proposés ces dernières années.

### 2.11.1 S-MAC et T-MAC

S-MAC présenté par Ye et al. [72] est l'un des premiers protocoles MAC basés sur le duty cycle. Une autre étude détaillée sur ce protocole est présentée dans [73] par Kaur et al. Dans S-MAC, chaque nœud capteur alterne entre une période active et période inactive afin de sauvegarder son énergie. Avec un tel mécanisme d'ordonnement, les nœuds capteurs peuvent économiser leur énergie en réduisant considérablement l'écoute active du canal. Toutefois, soulignons que ce protocole a quelques limitations. En effet, tous les nœuds capteurs diffusent leurs ordonnancements des périodes actives et inactives à tous leurs voisins de communication. Ainsi, avec ce mécanisme, nous pouvons noter une certaine perte d'efficacité énergétique et des collisions fréquentes (surtout dans le cas de réseaux denses). En outre, les périodes actives et inactives de chaque nœud sont prédéfinies et fixes, ce qui peut avoir des incidences sur le délai dans le cas de trafics variables. Enfin, tous les nœuds au niveau des frontières maintiennent leurs modules radio allumés durant toutes leurs périodes actives, ce qui a comme conséquence une sur-écoute du canal.

T-MAC (Time-out MAC) est une version améliorée du protocole S-MAC. Il est présenté respectivement dans [74] par Dam et Langendoen et dans [75] par Kakria et al. A l'instar de S-MAC, chaque nœud dans T-MAC alterne entre périodes actives et périodes inactives afin d'optimiser son énergie. La principale amélioration de T-MAC par rapport à S-MAC porte sur l'adaptation du duty cycle en fonction de la variation du trafic réseau. T-MAC augmente de façon significative la durée de vie du réseau par la réduction des longueurs des périodes actives, permettant ainsi à chaque nœud de pouvoir déterminer approximativement quand il sera actif ou inactif. Cependant, dans T-MAC, les nœuds diffusent également leurs ordonnancements des périodes actives et inactives à tous leurs voisins de communication via les paquets de synchronisation. Ainsi, à l'instar de S-MAC, ce mécanisme de diffusion n'est pas efficace en terme de consommation énergétique.

### 2.11.2 B-MAC et X-MAC

B-MAC (Berkeley MAC) [75, 76] est un autre protocole MAC à duty cycle qui a été développé par l'Université de Berkeley. Dans ce protocole, les nœuds capteurs utilisent la technique LPL (Low Power Listening) afin d'alterner entre périodes actives et périodes inactives. Dans la technique LPL, l'état actif de chaque nœud est généralement d'une durée très courte, permettant juste au nœud de vérifier l'état du canal (CCA: Clear Channel Assessment). En outre, afin d'assurer la synchronisation entre émetteurs et récepteurs, chaque nœud source précède sa transmission avec la diffusion d'un préambule de longueur supérieure au temps nécessaire pour que le (ou les) récepteur potentiel soit réveillé. De cette façon, B-MAC offre une bonne efficacité énergétique. Cependant, étant donné que ce protocole utilise le mécanisme CSMA-CA pour l'accès au canal, il souffre du problème de collisions fréquentes à forte charge. Une autre limitation de B-MAC est la sur-écoute du canal due à l'envoi d'un long préambule qui doit être nécessairement reçu par tous les voisins de communication (récepteurs potentiels) d'une source donnée, même si ces données ne sont pas destinées à tout le voisinage de cette source.

Une amélioration du protocole B-MAC appelée X-MAC est présentée dans [77]. L'apport majeur de X-MAC par rapport à B-MAC porte sur la résolution du problème de la sur-écoute du canal causée par la transmission de longs préambules. Pour ce faire, chaque préambule dans X-MAC est divisé en une série de préambules plus petits contenant chacun l'adresse du destinataire. Un certain intervalle de temps est inséré entre deux préambules successifs afin de permettre au destinataire adéquat d'envoyer un ACK dès la réception d'un préambule donné. Ainsi, avec ce mécanisme, l'émetteur pourra s'assurer que le récepteur est dans l'état actif après avoir reçu l'ACK de ce dernier, et pourra démarrer automatiquement sa transmission (TX). X-MAC fournit de meilleures performances en terme d'efficacité énergétique par rapport à B-MAC dans la mesure où il permet de réduire la sur-écoute du canal. Toutefois, ce protocole limite le choix des routes parce qu'il permet de choisir uniquement un seul nœud relais à un saut pour aiguiller les données jusqu'à la station de base. Par conséquent, cette contrainte sur le choix des routes peut poser des problèmes de robustesse au niveau du routage.

### 2.11.3 Z-MAC

Z-MAC [38, 77] est un protocole MAC hybride basé sur le duty cycle mais qui combine les techniques CSMA et TDMA. Les nœuds utilisent CSMA comme protocole d'accès au support et emploient un ordonnancement de type TDMA afin d'améliorer la résolution de la contention entre les nœuds. Ainsi, avec Z-MAC, chaque nœud du réseau démarre avec une phase de découverte de

voisinage à deux sauts afin de construire sa table de voisinage. Après cette phase, une deuxième phase d'attribution de « slots time » pour chaque nœud est lancée. Cette attribution est faite de telle sorte que deux nœuds dans un voisinage à deux sauts ne peuvent pas avoir les mêmes slots time. Avec cette technique, lorsqu'une source transmet, les interférences avec les autres transmissions de ses nœuds voisins à un saut sont évitées. Ainsi, dans Z-MAC, les nœuds peuvent se synchroniser pour accéder au canal sans problème de contention. Cependant, ce protocole n'est pas bien adapté dans une topologie de réseau dense. En effet, lorsque plusieurs nœuds voisins attendent d'émettre, ils doivent se disputer les slots time inoccupés par leurs voisins. Un tel mécanisme entraîne des contentions qui sont synchronisées au niveau de chaque slot time, réduisant ainsi la probabilité d'accès au canal. Un autre inconvénient de Z-MAC est que la consommation énergétique pour une transmission donnée dépend de la durée des slots time allouées pour cette TX. Donc, plus les durées des slots time sont élevées pour une TX plus la consommation énergétique augmente pour cette TX.

#### **2.11.4 TunableMAC**

TunableMAC, proposé dans [79] par Boulis est un protocole MAC avec des paramètres de duty cycle ajustables. A l'instar des autres protocoles MAC à duty cycle, dans TunableMAC, tous les nœuds ne sont pas répartis dans les mêmes périodes actives et inactives. Par conséquent, chaque source démarre sa transmission par la diffusion d'une série appropriée de balises de synchronisation afin de réveiller tous les récepteurs potentiels qui doivent relayer les paquets de cette source. Selon ce mécanisme, tous les voisins de communication d'une source donnée sont réveillés et impliqués systématiquement dans le processus de transmission de la source. Ainsi, avec cette stratégie de réveil, nous pouvons remarquer une certaine perte d'efficacité énergétique due à l'implication de tous les voisins d'une source donnée dans le processus de TX de cette dernière. Cette perte d'efficacité énergétique est d'autant plus importante que le réseau est dense. En outre, des collisions fréquentes peuvent être notées dans le cas de topologies de réseaux denses ou des topologies à couvertures de détections redondantes. Toutefois, TunableMAC est réputé pour être un protocole flexible du fait que les paramètres de duty cycle sont réglables. Notons que, ce protocole qui est intégré dans le simulateur Castalia [79] peut être utilisé pour faire des comparaisons avec de nouveaux algorithmes distribués de RCSF, basés sur les techniques de duty cycle, et qui utilisent l'accès CSMA-CA simple, c'est-à-dire, un accès au canal sans mécanisme RTS/CTS. C'est pour toutes les raisons évoquées ci-dessus que nous avons choisi de comparer l'algorithme DSMAC que nous avons proposé (qui est un algorithme d'ordonnancement distribué, basé sur le duty cycle et utilisant la technique d'accès CSMA-CA simple) avec ce protocole TunableMAC. Cet algorithme et ses différentes évaluations (analytique et par des simulations) sont présentés dans les chapitre 3 et 4.



### 2.11.5 Comparaison des protocoles MAC basés sur le duty cycle

Le tableau 3 illustre une comparaison des différents protocoles MAC basés sur le duty cycle présentés dans la section 2.11 en terme d'approches utilisées, d'avantages et d'inconvénients.

Tableau 3 : Comparaison des protocoles MAC basés sur le duty cycle

<b>Protocole</b> / <b>Caractéristiques</b>	<b>Approches utilisées</b>	<b>Principaux avantages</b>	<b>Principaux inconvénients</b>
<b>S-MAC</b>	duty cycle	-optimise la consommation énergétique en réduisant l'écoute active du canal	-diffusion des périodes actives et inactives à tous les voisins de communication -sur-écoute du canal par les nœuds de frontières
<b>T-MAC</b>	duty cycle	-optimise la consommation énergétique en adaptant le duty cycle en fonction de la variation de trafic	- diffusion des périodes actives et inactives à tous les voisins de communication
<b>B-MAC</b>	duty cycle avec la technique LPL (Low Power Listening)	-optimise la consommation énergétique par des mécanismes de synchronisation efficaces entre émetteurs et récepteurs	-collisions fréquentes à forte charge (surtout dans le cas de réseaux denses) - sur-écoute du canal due à l'envoi de longs préambules
<b>X-MAC</b>	duty cycle	-optimise la consommation énergétique en réduisant la sur-écoute du canal	-limite le choix des routes possibles entre sources et destinataires
<b>Z-MAC</b>	hybride combinant CSMA et TDMA	-minimise les collisions dans le réseau en réduisant les interférences entre nœuds voisins	-perte d'efficacité énergétique due au fait que la consommation énergétique est fonction de la durée de chaque slot time
<b>TunableMAC</b>	duty cycle	-flexible et paramétrable par l'utilisateur	-perte d'efficacité énergétique due au mécanisme de réveil de tous les voisins d'une source lors de chaque TX de cette dernière -collisions fréquentes dans le cas de réseaux denses

### 2.12 Synthèse des techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture et connectivité

Beaucoup de travaux sont publiés ces dernières années dans les domaines de l'optimisation de la durée de vie, du placement des nœuds, de la couverture et de la connectivité dans les RCSF. Une

synthèse de ces différentes techniques est présentée sur le tableau 4. Dans la suite, nous allons discuter les différentes problématiques liées à ces techniques d'optimisation qui sont encore ouvertes ou celles dont les solutions proposées restent à améliorer.

*Tableau 4 : Comparaison des techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture et de connectivité*

<b>Caractéristiques</b> <b>Type de technique</b>	<b>Degré d'optimisation de la durée de vie du réseau</b>	<b>Prend en compte un placement optimal des nœuds ?</b>	<b>Garantit les contraintes de couverture et de connectivité ?</b>	<b>Inconvénients majeurs</b>
<b>Techniques orientées « placement des nœuds, couverture et/ou connectivité »</b>	Faible	Oui	Oui	-Adaptées uniquement à un nombre limité d'applications
<b>Techniques orientées « optimisation multi-objectif sous contraintes »</b>	Elevé	Non	Oui	-N'est pas adapté à des applications qui exigent un placement optimal des nœuds
<b>Techniques orientées « protocoles MAC basés sur le duty cycle »</b>	Elevé	Non	Non	-Nécessite des mécanismes de synchronisations des nœuds -Complexes à mettre en œuvre -Collisions fréquentes dans le réseau

Comme illustré sur le tableau 4, il reste toujours des problématiques dans le domaine de l'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture complète de zone surveillée et de connectivité optimale du réseau. Nous allons discuter sur ces différentes problématiques dans la section 2.13.

## **2.13 Problématiques des techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture et connectivité**

### **2.13.1 Problématiques des techniques orientées « placement des nœuds, couverture et/ou connectivité »**

Les techniques orientées « placement des nœuds, couverture et/ou connectivité » ne permettent pas d'optimiser en même temps les paramètres de couverture, de connectivité et de durée de vie du réseau. Par exemple, la plupart de ces propositions visent un placement optimal des nœuds en vue d'assurer de bonnes propriétés de couverture de la zone d'intérêt et/ou de connectivité dans le

réseau. Ainsi, les mécanismes permettant d'optimiser en même temps la durée de vie du réseau sont souvent laissés de côté.

### **2.13.2 Problématiques des techniques orientées « optimisation multi-objectif sous contraintes »**

Les techniques orientées « optimisation multi-objectif sous contraintes » essaient d'étendre la durée de vie du réseau tout en prenant en compte les contraintes de couverture et/ou de connectivité. Ainsi, ces propositions donnent souvent de bonnes performances en termes de durée de vie, de couverture et/ou de connectivité. Cependant, nous remarquons que dans la quasi-totalité de ces approches multi-objectifs, le placement des nœuds est aléatoire et souvent non optimal. En plus, pour les applications citées telles que la surveillance critique de zone, l'agriculture de précision et le monitoring de l'habitat, une étude en amont et une connaissance du terrain de déploiement est souvent nécessaire afin de planifier un placement optimal des nœuds, tout en essayant de contourner certains obstacles qui peuvent exister dans le terrain de déploiement. En outre, la plupart des propositions basées sur les approches multi-objectifs proposent un partitionnement du RCSF en plusieurs sous-ensembles de couverture dont chacun peut couvrir toutes les surfaces de la zone (ou toutes les cibles). Ces couvertures sont ensuite activées une par une par le biais d'algorithmes d'ordonnement, ce qui permet ainsi d'améliorer la durée de vie du réseau. Cependant, la plupart de ces algorithmes d'ordonnement concentrent leurs stratégies d'activation uniquement au niveau des partitions de couverture, et ne prennent rarement en compte d'autres informations topologiques locales, par exemple, les propriétés de connectivité du réseau, l'état des voisins d'un nœud, etc. Par conséquent, certaines de ces approches multi-objectifs ont souvent des limites en termes de connectivité optimale du réseau.

### **2.13.3 Problématiques des protocoles MAC basés sur le duty cycle**

Enfin, les techniques orientées « protocoles MAC basés sur le duty cycle » se focalisent plus sur l'optimisation de la durée de vie et laissent souvent de côté les contraintes de couverture de la zone d'intérêt et celles de connectivité optimale du réseau. Notons que même si ces techniques sont généralement efficaces en termes de durée de vie, elles ont un certain nombre de limitations communes. En effet, dans la presque totalité de ces protocoles MAC, les nœuds diffusent leurs ordonnancements des périodes actives et inactives à tous leurs voisins de communication via des balises de synchronisation. Ainsi, tous les nœuds voisins à un saut d'une source donnée doivent être régulièrement activés et impliqués dans le processus de transmission de cette source, ce qui est inefficace en termes de consommation énergétique. En outre, ces mécanismes de réveil des voisins peuvent avoir comme conséquences des collisions fréquentes dans le cas de topologies de réseaux denses.

## **2.14 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous étudions les différentes techniques de l'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous des contraintes de couverture et de connectivité et les problématiques liées à ces techniques. Nous avons ainsi remarqué qu'il reste toujours des problématiques ouvertes dans ce domaine ou celles dont les solutions proposées restent encore à améliorer. C'est dans ce cadre que nous avons fait des propositions dans les chapitres 3 afin d'apporter notre contribution dans la résolution de ces problématiques. Dans un premier temps, ces propositions sont validées de façon analytique. Dans un second temps, elles sont évaluées par des simulations qui sont présentées dans le chapitre 4.

# Chapitre 3 : Propositions de nouvelles stratégies pour l'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture et de connectivité

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons étudié dans un premier temps différents modèles portant respectivement sur la couverture, le canal de communication, la connectivité et la consommation énergétique dans les RCSF. Ces modèles sont ensuite adaptés selon notre étude. Dans un second temps, nous avons fait des propositions qui s'articulent en deux niveaux :

1. *Le placement des nœuds capteurs* : nous avons mis en place un nouveau modèle de placement déterministe des nœuds qui permet non seulement de réduire le nombre de capteurs nécessaires pour couvrir complètement une zone de surveillance donnée, mais qui permet également d'assurer une connectivité dans le RCSF. Ce modèle de placement est présenté dans la section 3.3.
2. *La couche MAC* : nous avons mis en œuvre un nouvel algorithme d'ordonnement distribué appelé DSMAC (Distributed Scheduling Medium Access Control) qui exploite les propriétés géométriques de notre modèle de placement, et qui est basé sur la technique de duty cycle. DSMAC permet d'optimiser la consommation énergétique des nœuds capteurs dans l'ensemble du réseau durant les phases de communications (TX et RX), ce qui permet ainsi d'optimiser la durée de vie du réseau. Par ailleurs, les propriétés de couverture complète de la zone et celles de connectivité du RCSF, obtenues grâce à notre modèle de placement sont sauvegardées à tout moment de l'exécution de DSMAC. Cet algorithme est présenté dans la section 3.4.

## 3.2 Modélisation des composants et des paramètres du RCSF

### 3.2.1 Modèle de réseau

Le RCSF est modélisé par un graphe symétrique non orienté  $G=(V,E)$ , avec  $V$  désignant l'ensemble des sommets du graphe (les nœuds du réseau) et  $E \subset V^2$  représente l'ensemble des arêtes donnant toutes les communications possibles entre les nœuds. La cardinalité de  $V$  notée

$nb = |V|$  représente le nombre de nœuds dans le RCSF. Nous considérons un ensemble  $M = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  de nœuds capteurs déployés dans le réseau selon un modèle de placement déterministe qui est présenté dans la section 3.3.

Dans le graphe  $G$ , il existe une paire ordonnée  $(S_i, S_j) \in E^2$  si le nœud  $S_i$  est physiquement capable de transmettre des messages au nœud  $S_j$ . Dans ce cas, on dit que le nœud  $S_j$  se trouve dans la portée de communication du nœud  $S_i$ . Les couples appartenant à  $E$  dépendent de la position des nœuds et de leur portée de communication. Chaque nœud capteur  $S_i$  possède ainsi un rayon de communication noté  $Rc(S_i)$  déterminant sa portée de communication. Dans notre étude, tous les nœuds capteurs ont même portée de communication notée  $Rc$ . Donc, pour deux nœuds capteurs  $S_i$  et  $S_j$  tel que  $S_i \neq S_j$ ,  $Rc(S_i) = Rc(S_j) = Rc$ .

Chaque nœud capteur  $S_i$  possède également un rayon de détection noté  $Rs(S_i)$  déterminant sa portée de détection et lui permettant de surveiller l'environnement qui l'entoure. Dans notre contexte, tous les nœuds capteurs ont même portée de détection notée  $Rs$ . Donc, pour deux nœuds capteurs  $S_i$  et  $S_j$  tel que  $S_i \neq S_j$ ,  $Rs(S_i) = Rs(S_j) = Rs$ .

Tous les nœuds capteurs  $S_j$  localisés à l'intérieur de la portée de communication d'un nœud capteur  $S_i$  sont appelés des voisins de communication de  $S_i$  et cet ensemble est noté  $N(S_i)$ . Une liaison sans fil bidirectionnelle existe entre un nœud capteur  $S_i$  et chaque capteur  $S_j$  de son voisinage et est représentée par l'arc  $(S_i, S_j) \in E^2$  ou  $(S_j, S_i) \in E^2$ . Tous les nœuds voisins peuvent communiquer directement entre eux. Dans notre étude, tous les nœuds envoient leurs données capturées à un seul récepteur qui est la station de base par le biais de communications multi-sauts. Par conséquent, tous les nœuds appartenant au voisinage  $N(S_i)$  d'une source  $S_i$  donnée peuvent relayer les données transmises par cette source afin qu'elles puissent atteindre la station de base. La figure 16 montre un exemple d'illustration de ce modèle de RCSF.

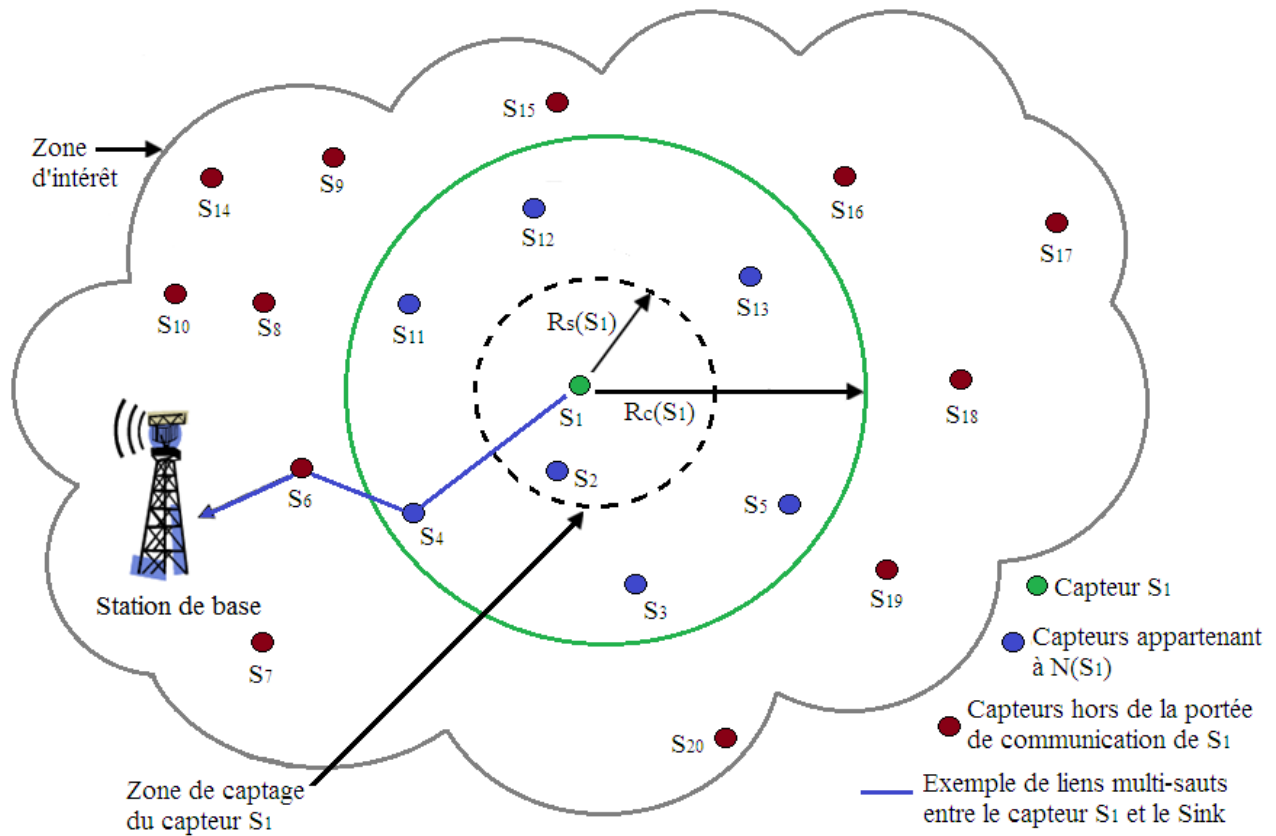


Figure 16: Exemple d'illustration du modèle de réseau

Le modèle de réseau est illustré sur la figure 16 où un ensemble de 20 capteurs,  $M = \{S_1, S_2, \dots, S_{20}\}$  sont déployés dans une zone d'intérêt donnée. L'ensemble des capteurs qui sont à la portée de communication du capteur  $S_1$  sont les capteurs de l'ensemble,  $N(S_1) = \{S_2, S_3, S_4, S_5, S_{11}, S_{12}, S_{13}\}$ . Chacun des capteurs de cet ensemble peut ainsi recevoir et relayer les données envoyées par  $S_1$ . Un exemple de lien de communication multi-sauts entre le capteur  $S_1$  et la station de base est  $\{(S_1, S_4), (S_4, S_6), (S_6, \text{station de base})\}$ .

### 3.2.2 Modèles du canal de communication

Les performances d'un système de communication sans fil sont déterminées en fonction du canal de communication dans lequel elles opèrent [89]. Les propriétés intrinsèques des RCSF telles que les faibles capacités de communication dues principalement aux faibles puissances d'émission, des liaisons radio peu fiables et les obstacles présents dans certains terrains de déploiement, ont fait que la modélisation dans ces réseaux n'est pas toujours une chose aisée.

Plusieurs modèles de communication radio ont été proposés pour les RCSF. Certains de ces modèles plus complexes et plus difficiles à exploiter essaient de prendre en compte toutes

propriétés liées aux communications sans fil (caractéristiques des liaisons radio, types de terrains de déploiements, etc.). D'autres modèles sont moins réalistes mais ils sont plus faciles à exploiter par des calculs analytiques.

### 3.2.2.1 Le modèle du disque unitaire

Le modèle du disque unitaire est le plus simple des modèles déterministes de communication bidirectionnels. Ce modèle suppose que chaque nœud capteur est capable de transmettre ses données à tout nœud capteur situé dans sa zone de couverture qui est déterminée par le disque de centre ce nœud capteur et dont le rayon égal à sa portée de communication, c'est-à-dire à  $R_c$ .

La portée de communication de chaque nœud capteur varie en fonction du niveau de sa puissance d'émission. Ainsi, selon ce modèle du disque unitaire, deux nœuds capteurs du réseau  $S_i$  et  $S_j$  peuvent communiquer, si et seulement si, la distance euclidienne notée  $d(S_i, S_j)$  entre ces deux nœuds capteurs est inférieure à ou égale à leur portée de communication  $R_c$ , c'est-à-dire :

$$d(S_i, S_j) \leq R_c \quad (3.1)$$

Par conséquent, dans ce modèle, la communication entre les nœuds capteurs est basée sur des considérations purement géométriques. Le modèle du disque unitaire est largement utilisé dans le cas des modèles analytiques parce qu'il permet de simplifier les calculs liés à de tels modèles. Cependant, il possède quelques limitations. En effet, ce modèle est considéré comme étant idéal dans la mesure où tous les messages sont toujours reçus sans erreur, c'est-à-dire, que les conditions de la couche MAC sont idéales, ce qui n'est toujours réaliste. La figure 17 illustre le modèle du disque unitaire.



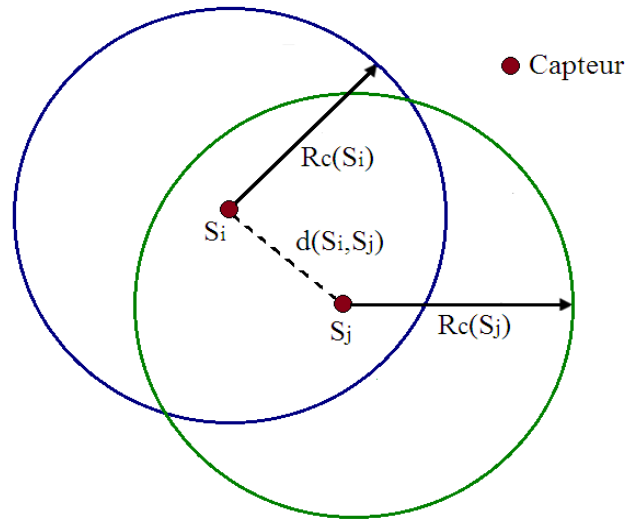


Figure 17 : Illustration du modèle du disque unitaire

### 3.2.2.2 Le modèle log-normal

Un autre modèle qui est également largement utilisé et qui prend en compte certaines propriétés du canal sans fil (comme la perte moyenne de trajet en fonction de la distance) est le modèle log-normal. Ce modèle permet d'évaluer la perte de trajet moyenne entre deux nœuds capteurs et plus généralement entre deux points quelconques de l'espace. Dans les applications des RCSF où les distances entre les nœuds capteurs varient généralement entre des dizaines de mètres et quelques centaines de mètres, le modèle log-normal permet d'estimer d'une façon plus précise la perte moyenne de trajet. L'équation (3.2) qui a été prise dans [89], permet d'estimer en décibels (dB) cette perte moyenne de trajet (également appelée affaiblissement moyen sur le trajet). Cette estimation est faite sur la base de la distance euclidienne entre deux nœuds capteurs, mais également sur la base d'autres paramètres décrits dans cette équation.

$$PL_0(d) = PL(d_0) + 10\eta \text{Log} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (3.2)$$

Dans cette équation,  $PL_0(d)$  représente la perte moyenne de trajet à une distance 'd' qui représente la distance euclidienne entre l'émetteur et le récepteur. Le paramètre  $PL(d_0)$  représente la perte moyenne de trajet connue à une distance de référence  $d_0$ . Le paramètre  $\eta$  représente la perte exponentielle de trajet qui est fonction de l'environnement où les capteurs sont déployés. Sa valeur est généralement prise dans l'intervalle [2-4]. Le paramètre  $X_\sigma$  est une variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle et d'écart type  $\sigma$ . Ainsi, avec cette formule, nous pouvons estimer la puissance  $P_r$

du signal reçu à une distance  $d$  (distance entre l'émetteur et le récepteur). Cette puissance  $P_r$  est la différence entre la puissance RF de sortie de l'amplificateur (ou puissance de l'émetteur) notée  $P_t$  et l'affaiblissement moyenne sur le trajet  $PL_0(d)$ , c'est-à-dire :

$$P_r = P_t - PL_0(d) \quad (3.3)$$

Dans cette équation, toutes les puissances sont exprimées en dB. En se basant sur les équations (3.2) et (3.3), nous avons ainsi :

$$P_r = P_t - \left( PL(d_0) + 10\eta \text{Log} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \right) \quad (3.4)$$

En utilisant l'équation (3.4), nous pouvons estimer et contrôler la portée de communication ( $R_c = d$ ) de chaque nœud capteur. Nous considérons dans notre cas d'étude, le modèle du disque unitaire afin de pouvoir faire des calculs analytiques portant surtout sur les preuves mathématiques de la connectivité du réseau que nous présentons dans la section 3.5. Ainsi, en considérant ce modèle de graphe  $G = (V, E)$  présenté dans le paragraphe 3.2.1 qui représente notre RCSF, l'ensemble des voisins de communication  $N(S_i)$  d'une source donnée  $S_i$  est donné par :

$$N(S_i) = \{S_j \in V / S_i \neq S_j / d(S_i, S_j) \leq R_c\} \quad (3.5)$$

D'autre part, nous considérons également le modèle log-normal afin de pouvoir déterminer la portée de communication  $R_c$  qui dépend de la puissance d'émission. Dans notre étude, tous les capteurs utilisent des puissances constantes et égales notées  $TX\_Power$ . Ainsi, pour une puissance d'émission donnée,  $R_c$  peut être calculé en utilisant l'équation (3.4) et les autres paramètres du modèle radio qui sont définis dans [79]. Ces paramètres :  $PL_0(d)$ ,  $d_0$ ,  $\eta$ , et  $X_\sigma$  sont données dans nos simulations qui sont présentées dans le chapitre 4.

Ensuite, le rayon de détection  $R_s$  des capteurs est déterminé en fonction du rayon de communication  $R_c$  selon nos hypothèses qui seront présentées dans la suite.

Enfin, c'est à partir du rayon de détection  $R_s$ , que nous allons calculer la longueur optimale du côté de la grille qui nous permet de partitionner la zone de surveillance et de pouvoir placer les capteurs selon notre modèle.

### 3.2.3 Modèle de détection des phénomènes physiques

Dans notre étude, on considère le modèle de détection des phénomènes physiques (mesures) qui est définie dans le simulateur Castalia [79]. Toutefois, nous allons adapter ce modèle est fonction de notre contexte.

Dans le modèle de détection présenté dans Castalia, chaque nœud capteur est doté d'un module de processus physique qui gère la détection des phénomènes physiques. Ce modèle est basé sur un nombre aléatoire de sources ponctuelles qui génèrent des phénomènes physiques et qui les diffusent dans l'espace. Une source ponctuelle donnée peut changer dans le temps et dans l'espace, donc les phénomènes physiques qu'elle génère peuvent changer en conséquence dans le temps et dans l'espace. Un phénomène qui se produit en un point  $p$  quelconque de la zone couverte par un ensemble de  $N$  nœuds capteurs noté  $M_N = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  est additif et sa valeur en ce point  $p$  de l'espace et à un instant „ $t$ “, notée  $V_{M_N}(p, t)$  est donnée par l'équation (3.6).

$$V_{M_N}(p, t) = \sum_{S_i \in M_N} \frac{V_{S_i}(t)}{(K * d(S_i, p)(t) + 1)^a} + N(0, \sigma) \quad (3.6)$$

Dans l'équation (3.6),  $V_{S_i}(t)$  représente la valeur du processus physique capturée par la  $i^{\text{ème}}$  source à un instant  $t$ , c'est-à-dire, par le capteur  $S_i$  à un instant  $t$ .  $d(S_i, p)(t)$  représente la distance euclidienne entre le point  $p$  la source  $S_i$  à un instant  $t$ . Les paramètres  $K$  et „ $a$ “ déterminent la manière dont une valeur d'un paramètre physique donné est diffusée dans l'espace. Enfin,  $N(0, \sigma)$  est une variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle et d'écart type  $\sigma$ . Dans Castalia, les valeurs des paramètres  $K$ , „ $a$ “ et  $\sigma$  sont respectivement fixées à 0.25, 1.0 et 0.2.

### 3.2.4 Modélisation de la couverture dans les RCSF

La couverture est une mesure de performance très importante dans les RCSF. Il existe plusieurs types de couverture dans les RCSF : couverture de points, couverture de surface, couverture de région et la couverture de barrière [40]. Cependant, nous considérons dans notre étude des couvertures de points, de surface et de région dans la mesure où ces trois types de couvertures suffisent largement pour étudier les propriétés de couvertures de la plupart des applications de RCSF.

Nous allons reprendre dans les paragraphes 3.2.4.1 et 3.2.4.2 quelques définitions analytiques présentées dans [39] qui sont liées aux notions de couvertures de points, de surface et de région.

### 3.2.4.1 Couverture de points dans les RCSF

Soit  $A$  une surface d'une région de surveillance donnée. On dit qu'un capteur  $S_i \in M$  couvre un point  $q \in A$ , si et seulement si :

$$d(S_i, q) \leq R_s \quad (3.7)$$

Un point  $q \in A$ , est dit  $k$ -couvert par un ensemble de  $k$  capteurs  $\{S_1, S_2, \dots, S_k\}$  si et seulement si, chacun de ces  $k$  capteurs couvrent à la fois le point  $q$ , c'est-à-dire, si et seulement si :

$$\forall S_i \in \{S_1, S_2, \dots, S_k\}, d(S_i, q) \leq R_s \quad (3.8)$$

### 3.2.4.2 Couverture de surface dans les RCSF

La couverture d'une surface par un capteur  $S_i \in M$  est définie comme étant la surface totale se trouvant à l'intérieur de la portée de détection de  $S_i$ . De façon analytique, une couverture de surface par un nœud capteur  $S_i \in M$  notée  $C(S_i)$  est définie par :

$$C(S_i) = \{q \in A / d(S_i, q) \leq R_s\} \quad (3.9)$$

Une couverture de surface par un ensemble de capteurs  $M_N = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  est définie analytiquement par :

$$C(M_N) = \bigcup_{k=1}^{|M_N|} C(S_k) \quad (3.10)$$

### 3.2.4.3 Couverture de région dans les RCSF

Soit  $A$  une région (zone) et soit  $q$  un point quelconque de  $A$ . La couverture de la région  $A$  par un ensemble de capteurs  $M_N = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  est définie analytiquement dans [37] par :

$$\forall q \in A, \exists S_k \in M_N / d(S_k, q) \leq R_s \quad (3.11)$$

Ces différentes équations sont utilisées dans la section 3.5.2 afin de donner les preuves analytiques de la couverture totale du réseau.

### 3.2.5 Modélisation de la connectivité du RCSF

Nous considérons dans notre une connectivité complète dans la mesure où nous utilisons des capteurs statique et une station de base statique. En outre, pour satisfaire aux conditions de couverture complète de la zone de surveillance et celles de connectivité du RCSF, nous faisons l'hypothèse que le rayon de communication  $R_c$  est égal au double du rayon de détection  $R_s$  (voir section 2.9.1). Donc, nous avons :

$$R_c = 2R_s \quad (3.12)$$

D'après l'équation (3.12), la condition de connectivité entre deux nœuds capteurs  $S_i$  et  $S_j$  du RCSF, présentée dans le paragraphe 3.2.2.1 devient alors :

$$d(S_i, S_j) \leq 2R_s \quad (3.13)$$

Nous utilisons l'équation (3.13) afin de donner les preuves mathématiques de la connectivité optimale du réseau. Ces preuves sont présentées dans le paragraphe 3.5.2.2.

Le graphe d'un réseau connecté est un graphe connexe. Un RCSF est dit  $k$ -connecté si le graphe associé à ce réseau est  $k$ -connexe, c'est-à-dire, qu'il existe au moins  $k$  chemins disjoints entre deux nœuds différents de ce graphe. La topologie associée à un tel réseau est ainsi appelée une topologie de  $k$ -connectivité. Par exemple, la figure 18 illustre une topologie de  $k$ -connectivité (avec  $k \geq 4$ ). Les lignes en pointillés illustrent les liens de connectivités entre les nœuds capteurs.

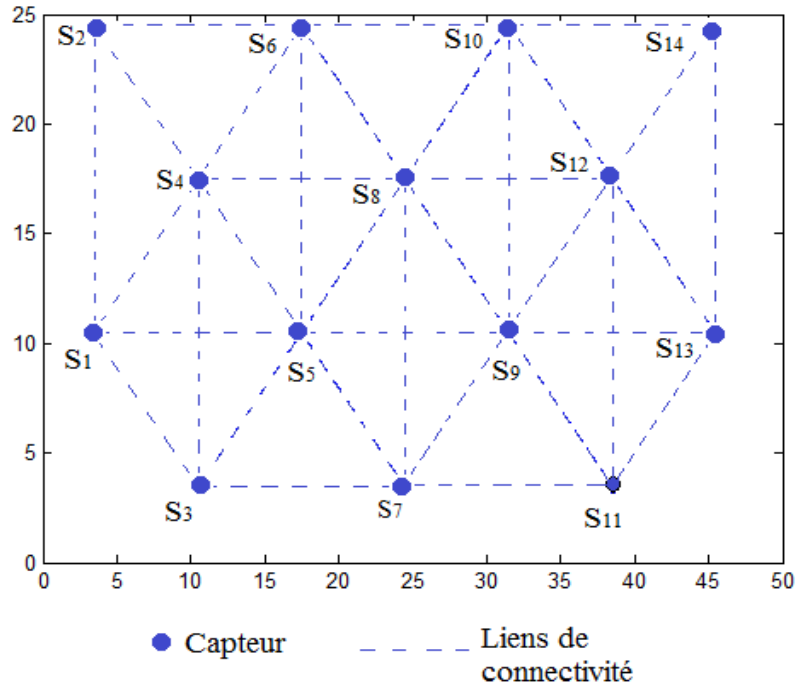


Figure 18: Exemple d'illustration d'une topologie de  $k$ -connectivité ( $k \geq 4$ )

### 3.2.6 Modèle de consommation énergétique

La modélisation de la consommation énergétique dans les RCSF fait partie des aspects de modélisation les plus importants dans ces réseaux étant donné que l'énergie est l'une des ressources les plus précieuses dans de tels réseaux. Plusieurs modèles de consommation énergétique ont été proposés afin d'étudier et d'évaluer les différents types de dissipation d'énergies dans ces réseaux. Cependant, vue la part importante de dissipation énergétique liée à la communication dans les RCSF, la plupart des modèles de ces consommation énergétique se focalisent plus sur l'évaluation des énergies liées à la communication. Ainsi, ces modèles prennent rarement en compte les autres formes de dissipations énergétiques qui sont généralement négligeables par rapport aux énergies de communication.

L'énergie de communication est divisée en deux parties : l'énergie de transmission (ou TX) et l'énergie de réception (ou RX). L'énergie de transmission d'un nœud capteur est l'énergie dépensée lors de la transmission des données, et l'énergie de réception d'un nœud capteur est donné l'énergie dépensée par ce nœud lors de la réception de données envoyées par un autre nœud. Etant que la communication dans les RCSF est gérée par un modèle en couche, les données échangées sont découpées en paquets. Nous supposons dans notre étude que les paquets sont de taille constante. Cependant, selon le modèle de communication utilisé, il existe généralement deux types de paquets dans les RCSF qui sont les paquets de données (mesures capturées par les nœuds) et les paquets de contrôle (messages de signalisation échangés entre nœuds capteurs dans le but d'assurer et de

maintenir certaines fonctionnalités du réseau).

Parmi les modèles de consommation énergétique proposés dans la littérature scientifique, nous allons présenter et adopter celui qui a été proposé dans [34] par Heinzelman et al. Il s'agit d'un modèle simple de consommation énergétique qui ne tient en compte que des énergies de transmission et de réception. Ainsi, selon ce modèle, pour transmettre un message de longueur  $k$  bits entre un émetteur et un récepteur distance de  $d$  (en mètre), le module radio de l'émetteur dépense la quantité énergétique (en Joules) donnée par l'équation suivante :

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) \quad (3.14)$$

Pour recevoir ce message, le module radio du récepteur dépense la quantité énergétique (en Joules) donnée par l'équation suivante :

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) \quad (3.15)$$

Dans ces deux équations,  $E_{Tx-elec}$  et  $E_{Rx-elec}$  représentent respectivement l'énergie électronique du transmetteur et celui du récepteur. La figure 19 illustre ce modèle de consommation énergétique [34].

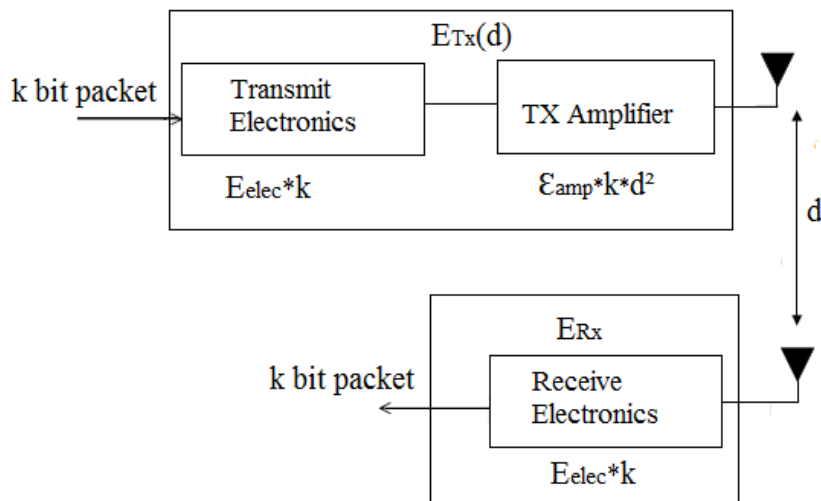


Figure 19 : Illustration du modèle de consommation énergétique [34]

$$E_{Tx-elec} = E_{Rx-elec} = E_{elec} = 50 \text{ nJ / bit} \quad (3.16)$$

$$\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ / bit / m}^2 \quad (3.17)$$

$\varepsilon_{amp}$  représente l'amplificateur du transmetteur.

D'après les équations (3.14), (3.15), (3.16) et (3.17), les quantités énergétiques dépensées pour une transmission (TX) et une réception (RX) d'un message de longueur  $k$  bis peuvent s'écrire respectivement :

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + \varepsilon_{amp} * k * d^2 \quad (3.18)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k \quad (3.19)$$

D'après les équations (3.18) et (3.19), nous remarquons que les énergies de communication (TX et RX) dépendent non seulement de la distance entre un émetteur et un récepteur, mais également de la longueur du message. Ainsi, pour pouvoir minimiser la consommation énergétique durant les phases de TX/RX, on peut soit diminuer la longueur des messages (taille des paquets), soit diminuer la distance entre émetteurs et récepteurs, soit diminuer les deux à la fois.

En effet, notons que dans le premier cas, si la longueur des paquets est très petite, alors le nombre de messages à envoyer va augmenter, ce qui va engendrer un surcoût sur la consommation énergétique. En revanche, si la longueur des paquets est trop grande, alors d'après les équations précédentes la consommation énergétique va augmenter. Donc, il faut essayer de trouver une valeur raisonnable, tout en tenant en compte des caractéristiques de l'application. En outre, cette longueur des paquets peut dépendre du modèle de communication en couche qui est utilisé (par, exemple IEEE 802.15.4, ZigBee).

Dans le second cas, pour minimiser la distance entre émetteurs et récepteurs, il faut tenir compte de la puissance d'émission qui détermine entre autre la portée. En effet, si les distances entre les nœuds sont très petites, alors il peut y avoir beaucoup d'interférences et par conséquent des collisions fréquentes. Ces dernières peuvent entraîner des retransmissions fréquentes de paquets, ce qui va ainsi augmenter la consommation énergétique des nœuds qui retransmettent leurs paquets.

### **3.3 Proposition d'une nouvelle méthode de placement géométrique des nœuds**

Considérons le modèle de placement de la figure 20.



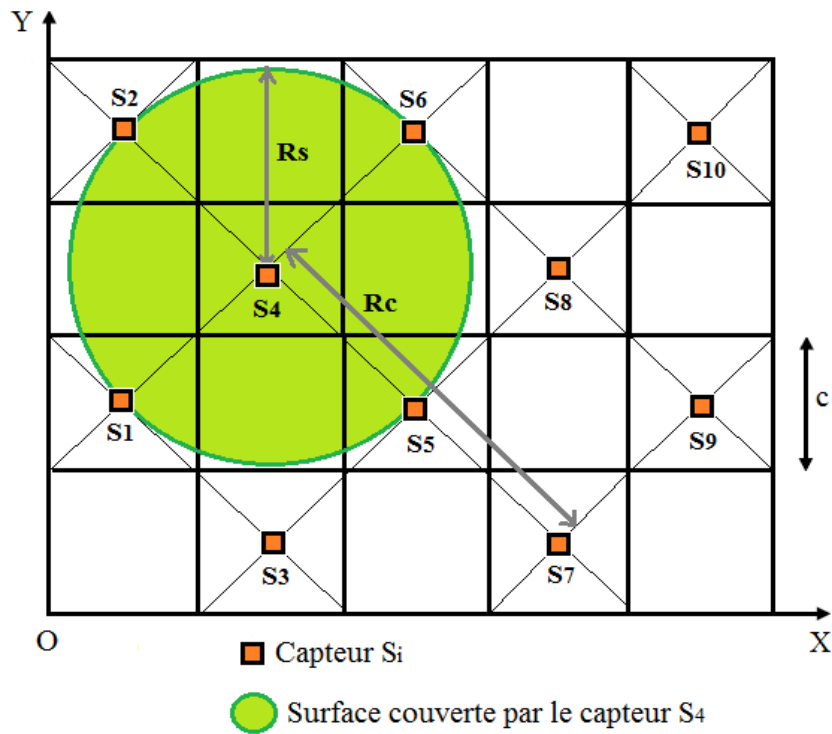


Figure 20: Modèle de placement géométrique des nœuds

Selon ce modèle de placement des capteurs décrit dans la figure 20, la zone de surveillance est partitionnée en grilles de carrés contigus de même dimension et dont le côté de chaque carré est égal à  $c$  (en mètre). Chaque capteur est placé en fonction de ses coordonnées  $(x, y)$  au milieu de certains carrés bien choisis de telle sorte que toute la totalité de la zone de surveillance soit couverte entièrement et que le graphe formé par l'ensemble des capteurs soit  $k$ -connexe (avec  $k \geq 4$ ). Les coordonnées des capteurs sont fonctions du côté  $c$  de la grille qui est déterminé en fonction du rayon de communication  $R_c$ .

Par ailleurs, avec cette méthode de placement, le nombre de capteurs nécessaires pour couvrir la totalité de la zone d'intérêt est en même temps réduit, ce qui permet d'optimiser le coût matériel du déploiement.

Ainsi, notre méthode de placement présente entre autre les avantages suivants :

- Le nombre de capteurs nécessaires pour couvrir la totalité de la zone de surveillance est optimisé ;
- La position et la surface couverte par chaque capteur sont connues et peuvent être respectivement déterminées par leurs coordonnées  $(x, y)$  et leur rayon de détection qui est fonction du côté de la grille  $c$ .
- Une couverture complète de la zone de surveillance, ainsi qu'une connectivité du RCSF

sont assurées.

- Il existe des redondances de couvertures bien maîtrisées et d'autres propriétés géométriques dues au modèle de placement, qui seront exploitées intelligemment afin de mettre en œuvre une politique d'ordonnement distribuée des états des capteurs dans le but d'optimiser la consommation énergétique du réseau.

Maintenant, nous allons calculer la longueur optimale du côté de la grille  $c$  qui nous permet d'assurer une couverture complète de la zone de surveillance, ainsi qu'une connectivité optimale du RCSF. Pour ce faire, nous allons nous baser sur notre hypothèse selon laquelle le rayon de communication de chaque de chaque  $R_c$  est le double de son rayon de détection  $R_s$ .

D'après la figure 20 :

$$R_s^2 = c^2 + c^2 \Leftrightarrow R_s = c\sqrt{2} \Leftrightarrow c = \frac{R_s}{\sqrt{2}} \quad (3.20)$$

En outre, en utilisant notre hypothèse suivante :

$$R_c = 2R_s \Leftrightarrow R_s = \frac{R_c}{2} \quad (3.21)$$

Ainsi, d'après les équations (3.20) et (3.21) :

$$c = \frac{R_c}{2\sqrt{2}} \quad (3.22)$$

En se référant à notre modèle de réseau décrite dans le paragraphe 3.2.1 où nous supposons que  $M = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  sont déployés dans la zone de surveillance selon notre modèle de placement décrit dans la figure 20 où chaque capteur  $S_i \in M$  a pour coordonnées  $(x, y)$  dans un repère à deux dimensions  $(O, X, Y)$ . Dans ce repère, les droites  $(OX)$  et  $(OY)$  désignent respectivement l'axe des abscisses et celui des ordonnées et  $O$  représente l'origine du repère.

Nous pouvons alors exprimer les coordonnées de chaque capteur  $S_i \in M$  en fonction de ' $c$ '. Par exemple, comme montré sur la figure 20 :

$$S_1\left(\frac{c}{2}, \frac{3c}{2}\right), S_2\left(\frac{c}{2}, \frac{7c}{2}\right), S_3\left(\frac{3c}{2}, \frac{c}{2}\right), S_4\left(\frac{3c}{2}, \frac{5c}{2}\right), S_5\left(\frac{5c}{2}, \frac{3c}{2}\right), S_6\left(\frac{5c}{2}, \frac{7c}{2}\right), S_7\left(\frac{7c}{2}, \frac{c}{2}\right), S_8\left(\frac{7c}{2}, \frac{5c}{2}\right), \\ S_9\left(\frac{9c}{2}, \frac{3c}{2}\right) \text{ et } S_{10}\left(\frac{9c}{2}, \frac{7c}{2}\right).$$

En se référant à cette méthode de placement et en se basant sur les équations (3.9) et (3.10) présentées dans le paragraphe 3.2.4.2 et décrivant respectivement la couverture d'une surface par un capteur donné  $S_i \in M$  et la couverture d'une zone par un ensemble  $M_k \subseteq M$ , nous voyons qu'une même surface de la zone de surveillance peut être couverte par plusieurs nœuds capteurs en même temps. Ceci est dû aux chevauchements de couvertures de surfaces de certains nœuds capteurs voisins. Par conséquent, étant donné que nous visons à optimiser la consommation énergétique des capteurs, il n'est pas nécessaire de maintenir tous les capteurs actifs en même temps. Par exemple, nous pouvons éteindre une partie des nœuds qui couvrent la même surface de la zone et laisser les autres nœuds afin qu'ils assurent les fonctionnalités du réseau (couverture, connectivité, communication). Ainsi, avec des stratégies d'ordonnement intelligentes et efficaces, nous pouvons optimiser la consommation énergétique dans l'ensemble du réseau, et ainsi améliorer la durée de vie de celui, tout en sauvegardant à tout moment de cette durée de vie les contraintes de couverture et de connectivité. Toutefois, pour atteindre cet objectif, il faut bien choisir l'ensemble des nœuds capteurs qui seront activés à un moment donné afin d'assurer toutes les fonctionnalités du RCSF. Les autres nœuds capteurs non activés vont sauvegarder leur énergie.

Dans la section 3.4, nous allons décrire les différentes caractéristiques de l'algorithme DSMAC, son fonctionnement ainsi que ses principaux avantages.

### **3.4 Présentation de l'algorithme DSMAC**

#### **3.4.1 Description de DSMAC**

DSMAC est un algorithme d'ordonnement distribué des états d'activité des capteurs. Il exploite les propriétés de couverture de notre modèle de placement présenté ci-dessus. Cet algorithme basé sur des techniques de duty cycle permet d'optimiser la consommation énergétique dans l'ensemble du réseau, tout en sauvegardant les propriétés de couverture complète de la zone d'intérêt et celles de connectivité optimale du réseau. Le pseudo-code de DSMAC qui illustre son fonctionnement est présenté dans le paragraphe 3.4.2.

### 3.4.2 Illustration de l’algorithme DSMAC sous forme de pseudo-code

**Inputs :**

- 1: “c” represents the length of a given grid according to our placement model
- 2: “ $M = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ ” represents the set of sensors deployed in the WSN according to our placement model
- 3: “ $d(S_i, S_j)$ ” represents the euclidean distance between two given sensors  $S_i, S_j \in M$
- 4: “Neighbor\_Table[ $S_i$ ]” represents the neighbor table of a given sensor  $S_i \in M$
- 5: “ID ( $S_i$ )” represents the ID (identifiant) of a given sensor  $S_i \in M$
- 6: “ $B_{ik}$ ” represents a beacon frame sent by a given source  $S_i \in M$

**Outputs :**

- A set of active sensors to relay packets send by a given source  $S_i$  and which ensure a full coverage of the monitored region and optimal network connectivity
- A set of sensors which are put in sleep mode to save their energy

```

7: for each sensor  $S_i \in M$  do
8:   for each sensor  $S_j \in M \wedge S_j \neq S_i$  do
9:     if  $d(S_i, S_j) \leq 2c\sqrt{2}$  then
10:      Insert (ID ( $S_j$ ), Neighbor_Table[ $S_i$ ])
11:    end if
12:  end for
13: end for
14: for each sensor  $S_i \in M$  which broadcast a train of beacon frames :  $\{B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{iN}\}$  do
15:   if  $S_j \in M$  receives  $B_{ik} \in \{B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{iN}\} \wedge \text{ID}(S_j) \in \text{Neighbor\_Table}[S_i]$  then
16:    if  $d(S_i, S_j) \leq c\sqrt{2}$  then
17:      Make  $S_j$  in sleep state until it receives a next beacon  $B_{ik}$ 
18:    else
19:      Make  $S_j$  active mode to relay packets transmit by the sender  $S_i$ 
20:    end if
21:  end if
22: end for

```

Comme illustré par le pseudo-code ci-dessus, DSMAC permet de réduire la consommation énergétique des capteurs durant toutes les phases de TX/RX dans l’ensemble du réseau, tout en sauvegardant les propriétés de couverture complète de la zone de surveillance et celles de connectivité optimale du réseau. Pour ce faire, cet algorithme se base sur le fonctionnement du protocole TunableMAC tout en exploitant la redondance de couverture de détection des capteurs due à notre modèle de placement. En effet, dans le protocole TunableMAC en particulier et dans d’autres protocoles MAC basés sur le duty cycle en général, tous les nœuds n’ont pas des périodes actives et inactives de longueurs égales, c’est-à-dire, que certains nœuds sont actifs au moment où d’autres sont éteints. Nous allons décrire respectivement dans les paragraphes 3.4.3 et 3.4.4 le mécanisme de sleep/wake-up utilisé dans le protocole TunableMAC et celui que nous avons mis en place pour l’algorithme DSMAC.

### 3.4.3 Mécanisme de sleep/wake-up dans TunableMAC

Dans le protocole TunableMAC, chaque source  $S_i$  précède la transmission des données par la diffusion d'un train de balises de synchronisation (beacon frame) afin de réveiller tous ses voisins potentiels qui doivent relayer ses données afin qu'elles atteignent la station de base. Selon ce mécanisme, tous les voisins de communication d'une source donnée sont réveillés et impliqués systématiquement dans le processus de transmission de cette source. Par conséquent, un tel mécanisme de réveil n'est pas efficace en terme de consommation énergétique parce que certains nœuds vont se réveiller régulièrement et consommer inutilement de l'énergie afin de participer au processus de transmission de chacun de leurs voisins. Nous remarquons également qu'un tel mécanisme n'est pas du tout adapté dans une topologie de réseaux denses parce qu'il peut y avoir beaucoup de réveils synchronisés des voisins d'une source donnée pour tenter d'accéder en concurrence et presque en même temps au support de transmission sans fil, ce qui peut augmenter le nombre de collisions dans le réseau.

### 3.4.4 Mécanisme de sleep/wake-up mis en œuvre pour DSMAC

Dans DSMAC, seule une partie du voisinage bien choisie d'une source donnée est réveillée afin de participer au processus de transmission de cette dernière. Les autres nœuds du voisinage de la source sont tous mis dans le mode sleep afin de sauvegarder leur énergie, ce qui va réduire la consommation énergétique dans l'ensemble du réseau et ainsi augmenter la durée de vie de celui-ci.

Cependant, l'ensemble des nœuds qui sont réveillés à un moment donné doivent assurer la continuité des services dans l'ensemble du réseau, afin de garantir la couverture complète de la zone de surveillance, et de maintenir une connectivité optimale dans le réseau. Ainsi, la couverture complète de la zone de surveillance et la connectivité optimale du réseau sont considérées dans notre contexte d'étude comme étant des contraintes qu'il faut obligatoirement satisfaire à tout moment de la durée de vie du RCSF. Afin de satisfaire à ces contraintes tout en assurant les autres services du réseau, chaque nœud capteur dans DSMAC utilise une table de voisinage qui contient l'ensemble des ID (identifiants) de ses voisins à un saut (de la ligne 7 à la ligne 13 du pseudo-code de l'algorithme DSMAC). Cet ensemble de voisinage déterminé par le rayon de communication  $R_c$  et est divisé en deux sous-ensembles :

- un voisinage proche qui sont tous les nœuds capteurs qui sont à une distance maximale de  $c\sqrt{2}$  d'une source donnée ;

- un voisinage lointain qui sont tous les nœuds à une distance strictement supérieure à  $c\sqrt{2}$  d'une source donnée ( $c$  étant la longueur du côté de la grille selon notre modèle de placement).

Pour une source donnée, seuls les nœuds de son voisinage lointain doivent être réveillés pour participer au processus de transmission des données de cette source (de la ligne 14 à la ligne 17 du pseudo-code de l'algorithme DSMAC); et tous les autres nœuds de son voisinage proche doivent être mis dans le mode sleep (de la ligne 18 à la ligne 20 du pseudo-code de l'algorithme DSMAC) afin de sauvegarder leur énergie.

Si ces nœuds reçoivent d'autres balises via d'autres sources données, alors ils vont décider conformément au fonctionnement de DSMAC décrit précédemment, s'ils doivent se réveiller pour relayer les paquets ou non (ligne 17 du pseudo-code de l'algorithme DSMAC).

Soulignons que le fait de réveiller le voisinage lointain d'une source donnée vient du fait que nous voulons maintenir les propriétés de couverture complète de la zone d'intérêt et celles d'une connectivité optimale dans le réseau. En effet, pour une source donnée, si nous choisissons de réveiller uniquement son voisinage proche, alors les contraintes de couverture complète de la zone d'intérêt ne seront plus satisfaites.

En outre, dans DSMAC, les nœuds n'ont pas des périodes actives fixes (respectivement des périodes inactives fixes), contrairement au protocole TunableMAC où les tous nœuds ont des périodes actives fixes (respectivement des périodes inactives fixes). Dans DSMAC, les périodes actives et inactives sont adaptées selon les temps de transmission de chaque nœud capteur. En plus, les nœuds sont réveillés selon leurs distances euclidiennes par rapport à une source donnée.

### **3.4.5 Principaux avantages de DSMAC**

L'algorithme DSMAC présente les avantages suivants :

1. il permet de réduire la consommation énergétique lors de chaque transmission d'une source donnée, ce qui permet d'accroître la durée de vie du réseau ;
2. il permet de garantir une couverture totale de la zone de surveillance à tout moment de la durée de vie du réseau, ainsi qu'une connectivité du RCSF ;
3. il permet de réduire les collisions qui sont généralement causées par les réveils synchronisés des nœuds voisins et aux tentatives d'accès simultanés au support de transmission sans fil.

Ces différents avantages de DSMAC sont prouvés de façon analytique et par des simulations. Ces preuves analytiques et ces preuves par des simulations sont respectivement présentées dans la section 3.5 et dans le chapitre 4.

### **3.5 Evaluations analytiques de DSMAC**

Dans cette section, nous allons évaluer dans un premier temps la complexité algorithmique de DSMAC afin de démontrer son efficacité quel que soit la charge et la taille du réseau. Dans un second temps, les conditions de couverture complète de la zone d'intérêt et celles de connectivité optimale du réseau, sont énoncées sous forme de deux théorèmes qui sont démontrés dans la suite.

#### **3.5.1 Etude de la complexité de DSMAC**

Cette section est consacrée à l'étude de la complexité algorithmique de DSMAC dans le but de prouver son efficacité dans le pire des cas. Pour ce faire, nous allons d'abord présenter quelques outils formels qui nous permettent de calculer la complexité d'algorithmes.

##### **3.5.1.1 Outils formels pour l'évaluation de la complexité algorithmique**

###### ***a. Définitions de la complexité algorithmique***

La complexité d'un algorithme est une évaluation du nombre d'opérations élémentaires en fonction de la taille et de la nature des données [83]. On appelle opération élémentaire, une opération qui prend un temps constant (ou plus exactement qui peut être considérée comme prenant un temps constant) [85]. La complexité d'un algorithme est également définie dans [84] comme étant une mesure de sa performance asymptotique dans le pire des cas, c'est-à-dire, dans le cas où le problème prend le plus de temps à résoudre. Ainsi, évaluer la complexité d'un algorithme, c'est donc chercher à évaluer le coût de cet algorithme en fonction des ressources utilisées par ce dernier. Ces ressources peuvent être le temps, la mémoire, etc. Cependant, on s'intéresse généralement à la complexité temporelle. Toutefois avant d'évaluer la complexité d'un algorithme, il faut d'abord définir ce que l'on attend par taille des données. Cette dernière est considérée dans la majeure partie des cas, et donc dans notre cas d'étude comme étant le nombre de bits de leur représentation en binaire. Dans la suite du document, nous noterons respectivement  $n$  et  $T(n)$  la taille des données (en bits) et le nombre d'opérations élémentaires pour un algorithme donné.

Il existe généralement trois types de complexité algorithmique : meilleur cas, pire des cas, cas moyen. Soit  $d$  une donnée quelconque de taille  $n$  (en bits) et notons  $\text{coût}_A(d)$  le coût d'un algorithme  $A$  associé à la donnée  $d$ , c'est-à-dire, la complexité de l'algorithme  $A$ .

- La complexité dans le meilleur cas est définie par :

$$\text{Inf}_A = \text{Inf} \{ \text{coût}_A(d) / \text{taille}(d) = n \} \quad (3.23)$$

- La complexité dans le pire cas est définie par :

$$\text{Sup}_A = \text{Sup} \{ \text{coût}_A(d) / \text{taille}(d) = n \} \quad (3.24)$$

- La complexité moyenne est définie par :

$$\text{Moy}_A(d) = \sum_{\text{taille}(d)=n} p(d) \times \text{coût}_A(d) \quad (3.25)$$

Avec  $p(d)$  représentant la probabilité sur l'ensemble des données de taille  $n$ . Cette probabilité est difficile à évaluer parce qu'il n'est pas toujours aisé de proposer un modèle des données réelles. On considère souvent que les données sont de mêmes tailles  $n$  et que leur distribution est uniforme. Dans ce cas, nous avons :

$$p(d) = \frac{1}{L(n)} \quad (3.26)$$

Avec  $L(n)$  représentant la longueur des données de taille  $n$ . D'après les équations (3.25) et (3.26), la complexité moyenne s'écrit alors :

$$\text{Moy}_A(n) = \sum_{\text{taille}(d)=n} \frac{1}{L(n)} \times \text{coût}_A(d) = \frac{1}{L(n)} \sum_{\text{taille}(d)=n} \text{coût}_A(d) \quad (3.27)$$

### ***b. Notations***

Dans ce paragraphe, nous allons donner quelques notations portant sur les ordres de grandeurs et les comportements asymptotiques, qui sont généralement utilisés dans l'évaluation de la complexité algorithmique.

Soient  $f$  et  $g$  deux fonctions de  $\mathbb{IN}$  dans  $\mathbb{IR}$ .

On dit que  $f$  est dominée asymptotiquement par  $g$  et on note souvent  $f = O(g)$  si et seulement si :



$\exists c \in \mathbb{R}^{*+}, \exists n_0 \in \mathbb{N}$ , tels que  $\forall n > n_0, f(n) \leq c \times g(n)$ .

On dit alors que  $f$  et  $g$  sont de même ordre de grandeur asymptotique et on note souvent  $f = \Theta(g)$  si et seulement si :  $\exists C_1, C_2 \in \mathbb{R}^{*+}, \exists n_0 \in \mathbb{N}$ , tels que  $\forall n > n_0, C_1 \times g(n) \leq f(n) \leq C_2 \times g(n)$ .

On dit que  $f$  est négligeable asymptotiquement devant  $g$  et on note souvent  $f = o(g)$  si et seulement si :  $\forall \varepsilon \in \mathbb{R}^{*+}, \exists n_0 \in \mathbb{N}$ , tels que  $\forall n > n_0, f(n) \leq \varepsilon \times g(n)$ .

En se basant sur ces notations, la complexité d'un algorithme est ainsi approximée par exemple en  $\Theta(n \log n)$ ,  $O(n^2)$ , etc. On dit dans ce cas que la complexité est respectivement de l'ordre  $\Theta(n \log n)$ ,  $O(n^2)$ , etc.

Un algorithme est dit en temps constant si sa complexité dans le pire des cas est bornée par une constante.

Il est dit linéaire(respectivement linéairement borné)si sa complexité dans le pire des cas est de l'ordre  $\Theta(n)$  (respectivement de l'ordre  $O(n)$ ).

Un algorithme est dit quadratique(respectivement au plus quadratique) si sa complexité dans le pire des cas est de l'ordre  $\Theta(n^2)$  (respectivement de l'ordre  $O(n^2)$ ).

Il est dit polynômial (ou borné polynômialement), si sa complexité dans le pire des cas est de l'ordre  $O(n^p)$  pour un certain  $p \in \mathbb{N}^*$ .

Enfin, un algorithme est dit exponentiel si sa complexité est de l'ordre  $O(2^{n^p})$  pour un certain  $p \in \mathbb{N}^*$ .

Le tableau 5 donne les complexités algorithmiques les plus fréquentes et leurs classes associées.

*Tableau 5 : Exemples de classes fréquentes de complexité*

<b>Complexité</b>	<b>Classe</b>
$O(1)$	constant
$O(\log(n))$	logarithmique
$O(n)$	linéaire
$O(n \log(n))$	sous-quadratique
$O(n^2)$	quadratique
$O(n^3)$	cubique
$O(2^n)$	exponentiel

Le tableau 6 montre les temps de calculs (en nombres d'instructions/seconde) pour un certain nombre de classes de complexités parmi les plus répandues.

Tableau 6 : Exemples de temps de calculs pour quelques classes de complexités

n	100n	nlogn	n <sup>2</sup>	n <sup>4</sup>	2 <sup>n</sup>
10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	2.10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>12</sup>	≈ 10 <sup>300</sup>
10 <sup>6</sup>	10 <sup>8</sup>	6.10 <sup>3</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>24</sup>	≈ 10 <sup>300000</sup>
10 <sup>9</sup>	10 <sup>11</sup>	9.10 <sup>3</sup>	10 <sup>18</sup>	10 <sup>36</sup>	≈ 3.10 <sup>18</sup>
10 <sup>12</sup>	10 <sup>14</sup>	12.10 <sup>3</sup>	10 <sup>24</sup>	10 <sup>48</sup>	2 <sup>10<sup>12</sup></sup>

**c. Evaluation de la complexité de quelques instructions fréquentes d'algorithmes**

Soit A un algorithme donné et soient respectivement n et T(n) la taille des données (en bits) et le nombre d'opérations élémentaire pour l'exécution de l'algorithme A, c'est-à-dire, la complexité de l'algorithme A. Nous allons présenter dans la section suivante l'évaluation de T(n) pour les types d'instructions d'un algorithme les plus répandues.

**d. Evaluation de la complexité pour une séquence d'instructions**

Soit la séquence d'instructions suivantes. Appelons T(n) le coût total de la complexité associée à cette séquence.

Traitement 1, associé à la complexité T<sub>1</sub>(n)

Traitement 2, associé à la complexité T<sub>2</sub>(n)

Alors nous avons :

$$T(n) = T_1(n) + T_2(n) \tag{3.28}$$

**e. Evaluation de la complexité pour un embranchement**

Soit la séquence d'instructions suivantes. Notons T(n) le coût total de la complexité associée à cette séquence.

**Si <condition> Alors**

Traitement 1, associé à la complexité T<sub>1</sub>(n)

**Sinon**

Traitement 2, associé à la complexité T<sub>2</sub>(n)

**Fin Si**

Alors nous avons :

$$T(n) = \max(T_1(n), T_2(n)) \quad (3.29)$$

**f. Evaluation de la complexité pour une boucle**

Soit la boucle Tant que suivante et soit  $T(n)$  le coût total de la complexité associée.

**Tant que**<condition>**Faire**

Traitement  $i$ , associé à la complexité  $T_i(n)$

**Fin Tant que**

Alors nous avons :

$$T(n) = \sum_{i=1}^k T_i(n) \quad (3.30)$$

**3.5.1.2 Calcul de la complexité algorithmique de DSMAC**

Soient respectivement  $n$  et  $T(n)$  la taille moyenne des données (en bits) et le coût de la complexité temporelle de l'algorithme DSMAC. Cet algorithme est composé des 2 grandes parties suivantes :

1. une première partie allant de la ligne 7 à la ligne 13 (du pseudo-code de DSMAC) qui permet à chaque nœud capteur  $S_i \in M$  de construire sa table de voisinage en y insérant tous les ID de ses voisins de communication à un saut.
2. Une seconde partie allant de ligne 14 à la ligne 22 (du pseudo-code de DSMAC) qui permet à chaque nœud capteur  $S_j$  appartenant à la table de voisinage d'une source  $S_i \in M$  de décider s'il doit se mettre dans le mode actif afin de relayer les paquets de cette source ou s'il doit se mettre dans le mode sleep afin de sauvegarder son énergie. Comme décrit dans le pseudo-code de cet algorithme, la décision de se mettre dans le mode sleep ou non est basée d'une part sur la distance euclidienne entre chaque source  $S_i \in M$  et chacun de ses voisins de communication, et d'autre part sur les balises de synchronisation qui précèdent toujours la transmission d'une source donnée.

Appelons respectivement  $T^A(n)$  et  $T^B(n)$  les coûts de complexités de la première partie et de la seconde partie de DSMAC décrites ci-dessus. Le coût total de la complexité de DSMAC est alors :

$$T(n) = T^A(n) + T^B(n) \quad (3.31)$$

Maintenant calculons les coûts des complexités respectives  $T^A(n)$  et  $T^B(n)$ . Pour ce faire, considérons dans un premier temps la première partie de l'algorithme DSMAC décrite ci-dessus. Soit  $T_2^A(n)$  le coût de la complexité de la boucle for de cette partie de DSMAC (de la ligne 8 à la ligne 12 du pseudo-code de DSMAC). Nous avons alors :

$$T^A(n) = \sum_{k=1}^N T_2^A(n) \quad (3.32)$$

Soit  $T_1^A(n) = c_1$ , le coût de la complexité de l'instruction élémentaire de la ligne 10. En se référant au calcul du coût de la complexité pour une séquence d'instructions donné par l'équation (3.28) de la section 3.5.1.1, et en tenant compte du fait que chaque nœud capteur  $S_i \in M$  a au plus 12 voisins de communication à un saut (cf. figure 21), nous avons :

$$T_2^A(n) = \sum_{i=1}^N \frac{T_1^A(n)}{12} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^N c_1 = \frac{N \times c_1}{12} \quad (3.33)$$

Comme  $\frac{N \times c_1}{12} \in \mathbb{R}$ , posons  $c_2 = \frac{N \times c_1}{12} \in \mathbb{R}$ . Ainsi, d'après (3.32) et (3.33), nous avons :

$$T^A(n) = \sum_{i=1}^N T_2^A(n) = \sum_{i=1}^N c_2 = N \times c_2 \quad (3.34)$$

Calculons maintenant  $T^B(n)$ . Pour ce faire, appelons respectivement  $T_{11}^B(n) = c_3 \in \mathbb{R}$  et  $T_{12}^B(n) = c_4 \in \mathbb{R}$ , le coût de la complexité de l'instruction élémentaire de la ligne 17 et celui de la ligne 19 du pseudo-code de l'algorithme DSMAC. Soit ensuite  $T_1^B(n)$  le coût de la complexité de l'embranchement conditionnelle allant de la ligne 16 à la ligne 19 de l'algorithme DSMAC.

En se référant au calcul du coût de la complexité pour un embranchement donné par l'équation (3.29) présentée dans le paragraphe 3.5.1.1, nous avons :

$$T_1^B(n) = \max(T_{11}^B(n), T_{12}^B(n)) = \max(c_3, c_4) \quad (3.35)$$

D'après l'équation (3.35) :

$$T^B(n) = \sum_{i=1}^N T_1^B(n) = \sum_{i=1}^N \max(T_{11}^B(n), T_{12}^B(n)) = \sum_{i=1}^N \max(c_3, c_4) \quad (3.36)$$

L'équation (3.36) peut être écrite comme suit :

$$T^B(n) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N c_3 = N \times c_3 & \text{si } c_3 \geq c_4 \\ \sum_{i=1}^N c_4 = N \times c_4 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.37)$$

D'après les équations (3.31), (3.34) et (3.7) :

$$T(n) = T^A(n) + T^B(n) = N \times c_2 + \max(N \times c_3, N \times c_4) \quad (3.38)$$

$$\text{Posons } \max(N \times c_3, N \times c_4) = N \times c_5 \in \mathbb{R} \quad (3.39)$$

D'après (3.38) et (3.39), nous avons :

$$T(n) = N \times c_2 + N \times c_5 = N \times (c_2 + c_5) \quad (3.40)$$

Comme  $c_2, c_5 \in \mathbb{R}$  et  $N \in \mathbb{IN}$  représente le nombre de nœuds dans le RCSF, alors d'après les définitions présentées dans la section 3.5.1.1 et le tableau 5 de cette section, la complexité de DSMAC est linéaire. D'autre part, étant donné qu'une complexité linéaire fait partie des meilleures classes de complexité algorithmique, alors nous pouvons en déduire que DSMAC est un algorithme efficace.

### 3.5.2 Etude analytique de la couverture et de la connectivité dans DSMAC

Dans cette section, nous énonçons deux théorèmes qui portent respectivement sur la couverture complète de la zone de surveillance et sur la connectivité du RCSF selon notre modèle de placement et selon l'algorithme DSMAC. Ces deux théorèmes sont démontrés dans la suite.

### 3.5.2.1 Théorème d'existence d'une couverture totale de la zone d'intérêt selon DSMAC

*Soit  $A$  la surface couverte par un ensemble de  $N$  capteurs  $M = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  déployés dans une zone de surveillance donnée selon notre modèle de placement décrit dans la section 3.3. Alors, à tout moment de la durée de vie du réseau,  $A$  reste totalement couverte par l'ensemble des capteurs actifs du réseau selon notre modèle de placement et l'algorithme DSMAC.*

#### - **Démonstration**

Comme nous l'avons dit dans la description de DSMAC, chaque source  $S_i(x_i, y_i) \in M$  précède sa transmission des données (paquets) par la diffusion d'une série de balises de synchronisation  $B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{ik}$  afin de réveiller les capteurs de son voisinage lointain qui doivent relayer les paquets de la source  $S_i$ . Conformément à l'algorithme DSMAC, les capteurs du voisinage lointain d'une source  $S_i(x_i, y_i) \in M$  sont tous les nœuds qui sont à une distance strictement supérieure à  $c\sqrt{2}$  de cette source. Leurs coordonnées peuvent ainsi être exprimées en fonction du côté de la grille  $c$  et des coordonnées  $x_i, y_i$  de  $S_i$  comme suit :

$$\begin{aligned} & (x_i, y_i - 2c), (x_i, y_i + 2c), (x_i - 2c, y_i - 2c), (x_i - 2c, y_i), (x_i - 2c, y_i + 2c), \\ & (x_i + 2c, y_i - 2c), (x_i + 2c, y_i), (x_i + 2c, y_i + 2c) \end{aligned} \quad (3.41)$$

De la même manière, les coordonnées des nœuds capteurs du voisinage proche de  $S_i(x_i, y_i) \in M$  sont données par :

$$(x_i - c, y_i - c), (x_i - c, y_i + c), (x_i + c, y_i - c), (x_i + c, y_i + c) \quad (3.42)$$

Considérons la figure 21 qui illustre les deux types de voisinage (proche et lointain) d'une source  $S_i(x_i, y_i)$ .

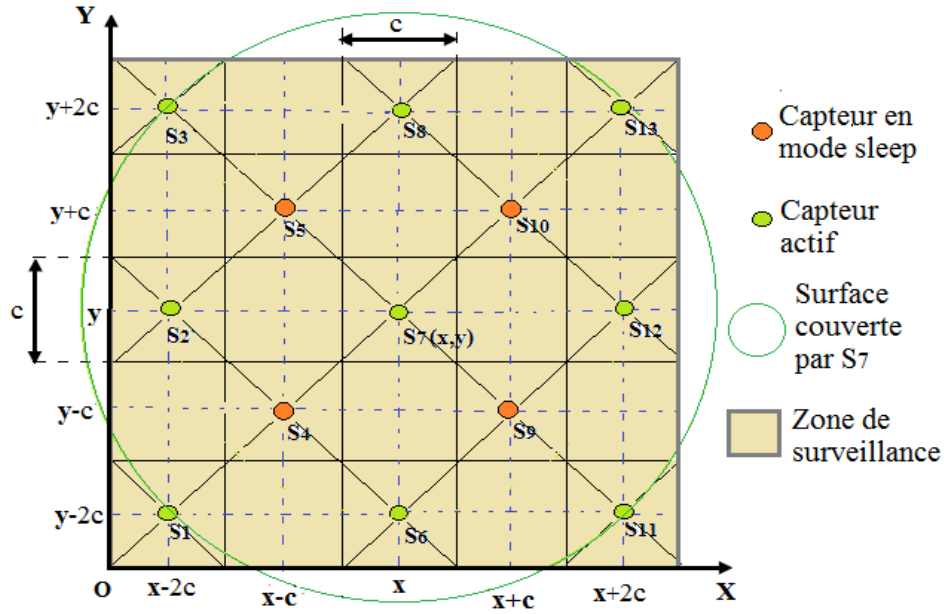


Figure 21: Illustration des coordonnées des voisins (proches et lointains) du capteur  $S_7$

Comme illustré sur la figure 21, nous avons considéré que  $S_i(x_i, y_i) = S_7(x, y)$ . Donc, nous avons :  $x_i = x$  et  $y_i = y$ . Ainsi, les coordonnées des nœuds du voisinage lointain de la source  $S_i(x_i, y_i)$  données par la relation (3.41) deviennent alors :

$$\begin{aligned} & (x, y - 2c), (x, y + 2c), (x - 2c, y - 2c), (x - 2c, y), \\ & (x - 2c, y + 2c), (x + 2c, y - 2c), (x + 2c, y), (x + 2c, y + 2c) \end{aligned} \quad (3.43)$$

Les autres coordonnées des nœuds du voisinage proche de  $S_i(x_i, y_i)$  données par la relation (3.42) deviennent :

$$(x - c, y - c), (x - c, y + c), (x + c, y - c), (x + c, y + c) \quad (3.44)$$

Selon la figure 21 et conformément au fonctionnement de DSMAC, la table de voisinage du capteur  $S_7$  est donné par :

$$\text{Neighbor\_Table}[S_7] = \left\{ \begin{array}{l} \text{ID}(S_1), \text{ID}(S_2), \text{ID}(S_3), \text{ID}(S_4), \text{ID}(S_5), \text{ID}(S_6), \text{ID}(S_8), \\ \text{ID}(S_9), \text{ID}(S_{10}), \text{ID}(S_{11}), \text{ID}(S_{12}), \text{ID}(S_{13}) \end{array} \right\} \quad (3.45)$$

L'ensemble des nœuds de ce voisinage de  $S_7$  qui seront réveillés à chaque transmission de la source

considéré  $S_7$  est donné par :

$$\{S_1, S_2, S_3, S_6, S_8, S_{11}, S_{12}, S_{13}\} \quad (3.46)$$

L'ensemble des nœuds du voisinage proche de la source  $S_7$  qui seront mis dans le mode sleep lors d'une transmission de  $S_7$  est donné par :

$$\{S_4, S_5, S_9, S_{10}\} \quad (3.47)$$

Ainsi, d'après les relations (3.46) et (3.47), pour prouver que la surface couverte par l'ensemble des 13 capteurs  $\{S_1, S_2, S_3, \dots, S_{13}\}$  du réseau reste complètement couverte lors de l'exécution de DSMAC, il suffit de prouver que les capteurs actifs du réseau couvrent totalement la zone de surveillance. Autrement dit, il suffit de prouver que les capteurs  $S_1, S_2, S_3, S_6, S_8, S_{11}, S_{12}, S_{13}$  et  $S_7$  qui sont actifs couvrent complètement les surfaces de la zone qui ont été couvertes par les capteurs  $S_4, S_5, S_9$  et  $S_{10}$  qui sont dans le mode sleep. Pour ce faire, considérons le capteur  $S_4$ , et écrivons sa couverture de surface décrite par l'équation (3.9) présentée dans le paragraphe 3.2.4.2.

$$C(S_4) = \{q \in A / d(S_4, q) \leq c\sqrt{2}\} \quad (3.48)$$

D'autres part, en considérant les capteurs  $S_1, S_2, S_7$  et  $S_6$  qui sont autour du capteur  $S_4$ , alors la couverture de surface de chacun de ces capteurs est donnée d'après l'équation (3.9) par :

$$C(S_1) = \{q \in A / d(S_1, q) \leq c\sqrt{2}\} \quad (3.49)$$

$$C(S_2) = \{q \in A / d(S_2, q) \leq c\sqrt{2}\} \quad (3.50)$$

$$C(S_7) = \{q \in A / d(S_7, q) \leq c\sqrt{2}\} \quad (3.51)$$

$$C(S_6) = \{q \in A / d(S_6, q) \leq c\sqrt{2}\} \quad (3.52)$$

Considérons maintenant l'ensemble  $S_c = \{S_1, S_2, S_6, S_7\}$ . En se basant sur la couverture de surface par un ensemble de capteurs par donnée par l'équation (3.10) présentée à la section 3.2.4, nous avons :



$$C(S_c) = C(S_1) \cup C(S_2) \cup C(S_6) \cup C(S_7) \quad (3.53)$$

D'autre part, en se référant à la figure 21 et en calculant les distances euclidiennes entre chacun des capteurs  $S_j \in S_c$  et le capteur  $S_4$ , nous avons :

$$d^2(S_4, S_1) = [(x - c) - (x - 2c)]^2 + [(y - c) - (y - 2c)]^2 = 2c^2 \Rightarrow d(S_4, S_1) = c\sqrt{2} \quad (3.54)$$

$$d^2(S_4, S_2) = [(x - c) - (x - 2c)]^2 + [(y - c) - y]^2 = 2c^2 \Rightarrow d(S_4, S_2) = c\sqrt{2} \quad (3.55)$$

$$d^2(S_4, S_7) = [(x - c) - x]^2 + [(y - c) - y]^2 = 2c^2 \Rightarrow d(S_4, S_7) = c\sqrt{2} \quad (3.56)$$

$$d^2(S_4, S_6) = [(x - c) - x]^2 + [(y - c) - (y - 2c)]^2 = 2c^2 \Rightarrow d(S_4, S_6) = c\sqrt{2} \quad (3.57)$$

D'après (3.54), (3.55), (3.56) et (3.57) :

$$d(S_4, S_1) = d(S_4, S_2) = d(S_4, S_6) = d(S_4, S_7) = c\sqrt{2} \quad (3.58)$$

Ainsi, d'après les couvertures de surfaces des capteurs  $S_1, S_2, S_6$  et  $S_7$  données respectivement par les équations (3.49), (3.50), (3.51), (3.52) et en se basant respectivement sur les équations (3.53) et (3.58), nous avons alors :

$$C(S_4) \subseteq C(S_1) \cup C(S_2) \cup C(S_6) \cup C(S_7) \quad (3.59)$$

Donc, d'après l'équation (3.59), les capteurs  $S_1, S_2, S_6, S_7$  couvrent totalement la surface couverte par le capteur  $S_4$ .

Par un raisonnement similaire au précédent, nous pouvons démontrer que les capteurs  $S_2, S_3, S_8, S_7$  (respectivement les capteurs  $S_6, S_{11}, S_{12}, S_7$ ) couvrent totalement la surface couverte par le capteur  $S_5$  (respectivement le capteur  $S_9$ ).

Enfin, les capteurs  $S_8, S_{13}, S_{12}, S_7$  couvrent totalement la surface couverte par le capteur  $S_{10}$ .

Etant donné que le capteur  $S_7(x, y)$  est choisi de façon quelconque, alors la surface (zone de surveillance) reste totalement couverte à tout moment de l'exécution de l'algorithme DSMAC.

### 3.5.2.2 Théorème d'existence d'une connectivité optimale du RCSF selon DSMAC

Soit un ensemble de  $N$  capteurs  $M = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$  déployés dans une zone de surveillance donnée selon notre modèle de placement décrit dans la section 3.3. Alors, selon ce modèle de placement et l'algorithme DSMAC, l'ensemble des capteurs actifs du réseau restent  $k$ -connectés (avec  $k \geq 4$ ) à tout moment de la durée de vie de ce réseau.

#### - **Démonstration**

D'après la condition de connectivité des nœuds donnée par la relation (3.13) présentée dans la section 3.2.5, deux capteurs  $S_i$  et  $S_j$  sont connectés selon notre modèle et nos hypothèses si et seulement si :

$$d(S_i, S_j) \leq 2c\sqrt{2} \quad (3.60)$$

En se référant à la définition de la  $k$ -connectivité présentée dans la section 3.2.5, le RCSF est  $k$ -connecté si et seulement si, il existe  $k$  routes distinctes entre chaque capteur  $S_i$  du réseau vers la station de base. Etant donné que nous utilisons un routage multi-saut, le RCSF est dit  $k$ -connecté si et seulement si il existe  $k$  routes distinctes entre chaque capteurs  $S_i$  et l'ensemble des capteurs de son voisinage à un saut. Conformément au fonctionnement de l'algorithme DSMAC, seul les capteurs d'un voisinage lointain d'une source  $S_i$  sont activés durant le processus de transmission de cette source. Par conséquent, le RCSF est  $k$ -connecté selon DSMAC, si tous les nœuds actifs pendant le processus de transmission d'une source donnée sont  $k$ -connectés. Donc, pour prouver que le RCSF est  $k$ -connecté selon DSMAC, il suffit de prouver que tous les nœuds capteurs du voisinage lointain d'une source donnée sont  $k$ -connectés à cette dernière.

Considérons une source  $S_i(x, y)$  et notons  $Remote\_Neighbor\_S_{x,y}$  l'ensemble des capteurs de son voisinage lointain qui devront être activés selon l'algorithme DSMAC. En se référant à la relation (3.45) (cf. paragraphe 3.5.2.2) qui donne les coordonnées en fonction de  $c$ ,  $x$  et  $y$  de cet ensemble, nous pouvons écrire :

$$Remote\_Neighbor\_S_{x,y} = \left\{ \begin{array}{l} S_{N1}(x, y - 2c), S_{N2}(x, y + 2c), S_{N3}(x - 2c, y - 2c), S_{N4}(x - 2c, y) \\ S_{N5}(x - 2c, y + 2c), S_{N6}(x + 2c, y - 2c), S_{N7}(x + 2c, y), S_{N8}(x + 2c, y + 2c) \end{array} \right\}$$

Si nous calculons la distance euclidienne entre le capteur  $S_i(x, y)$  et chacun des capteurs  $S_j \in \text{Remote\_Neighbor\_}S_{x,y}$ , nous avons alors :  $d(S_i, S_j) \leq 2c\sqrt{2}$ .

Par exemple :

$$d^2(S_i, S_{N1}) = (x - x)^2 + (y - (y - 2c))^2 = (2c)^2 \Rightarrow d(S_i, S_{N1}) = \sqrt{(2c)^2} = 2c \leq 2c\sqrt{2}, \text{ donc :}$$

$$d(S_i, S_{N1}) \leq 2c\sqrt{2} \quad (3.61)$$

$$d^2(S_i, S_{N2}) = (x - x)^2 + (y - (y + 2c))^2 = (-2c)^2 \Rightarrow d(S_i, S_{N2}) = \sqrt{(2c)^2} = 2c \leq 2c\sqrt{2}, \text{ donc:}$$

$$d(S_i, S_{N2}) \leq 2c\sqrt{2} \quad (3.62)$$

$$d^2(S_i, S_{N3}) = (x - (x - 2c))^2 + (y - (y - 2c))^2 = 8c^2 \Rightarrow d(S_i, S_{N3}) = \sqrt{8c^2} = 2c\sqrt{2} \leq 2c\sqrt{2}, \text{ donc :}$$

$$d(S_i, S_{N3}) \leq 2c\sqrt{2} \quad (4.63)$$

De la même manière, nous pouvons montrer que :

$$d(S_i, S_{N4}) \leq 2c\sqrt{2} \quad (3.64)$$

$$d(S_i, S_{N5}) \leq 2c\sqrt{2} \quad (3.65)$$

$$d(S_i, S_{N6}) \leq 2c\sqrt{2} \quad (3.66)$$

$$d(S_i, S_{N7}) \leq 2c\sqrt{2} \quad (3.67)$$

$$d(S_i, S_{N8}) \leq 2c\sqrt{2} \quad (3.68)$$

D'après (3.61), (3.62), (3.63), (3.64), (3.65), (3.66), (3.69) et (3.67) :

$$\forall S_j \in \text{Remote\_Neighbor\_}S_{x,y}, d(S_i, S_j) \leq 2c\sqrt{2} \quad (3.69)$$

Ainsi, d'après (3.69) et en se référant l'équation (3.60) qui décrit la condition de connectivité entre deux nœuds capteurs  $S_i, S_j$  quelconques du RCSF, alors tous les capteurs  $S_j \in \text{Remote\_Neighbor\_}S_{x,y}$  sont connectés au capteur  $S_i(x, y)$ , c'est-à-dire, tous les capteurs actifs appartenant au voisinage

lointain d'une source  $S_i$  donnée sont connectés à cette dernière. Puisque le capteur  $S_i$  est choisi de façon quelconque alors tous les capteurs actifs du voisinage lointain d'une source donnés sont connectés à cette source.

D'autre part, en se basant sur la définition de la  $k$ -connectivité en se référant à la figure 21, il existe au moins 4 routes distinctes entre chaque nœud capteur  $S_i$  et la station de base, en considérant l'ensemble des capteurs de son voisinage lointain comme étant les relais intermédiaires (communication multi-saut). Par conséquent, le RCSF est au moins 4-connecté à tout moment de l'exécution de DSMAC.

### **3.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté nos différentes propositions et leurs évaluations analytiques. Ces évaluations mathématiques ont montré que l'algorithme DSMAC que nous avons proposé pour l'ordonnancement distribué des états des capteurs permet de garantir une couverture complète de la zone de surveillance et une bonne connectivité du RCSF. En outre, l'efficacité de cet algorithme en terme de complexité algorithmique est également démontrée.

Le prochain chapitre est consacré aux évaluations de DSMAC par des simulations afin de mesurer ses performances et faire des comparaisons par rapport à d'autres propositions de l'état de l'art.

# Chapitre 4 : Evaluation de DSMAC

## 4.1 Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre les évaluations de DSMAC par des simulations faites en utilisant Castalia 3.2 [79] qui est un simulateur pour les RCSF, les réseaux BAN (Body Area Network) et plus généralement pour des réseaux utilisant des systèmes embarqués de faibles capacités de stockages et de calculs. Ce simulateur est basé sur la plateforme OMNeT++[86, 87].

Castalia présente plusieurs avantages par rapport à d'autres simulateurs de RCSF tels que NS2, NS3, OPNET, OMNeT++, SensorSim, etc. Parmi ces avantages nous pouvons Castalia citer :

- l'intégration d'un modèle de détection des phénomènes physiques capturés par les nœuds ;
- la prise en compte de certaines caractéristiques essentielles du canal sans fil telles que les variations temporelles, la perte moyenne de trajet en fonction de la distance, etc.
- des outils pour le calcul, le traçage et de la visualisation des métriques de simulation (calculs des énergies consommées et résiduelles des capteurs, calculs des paquets reçus par la station de base, calcul du niveau de latence des paquets, calcul de distances entre les capteurs, etc.) ;
- des mécanismes qui permettent la modélisation et l'intégration des paramètres de couverture et de connectivité du réseau ;
- des applications de tests qui sont paramétrables par l'utilisateur.

Ainsi, pour tous ces avantages évoqués ci-dessus, nous avons choisi le simulateur Castalia parce qu'il est plus adapté pour les évaluations et la validation de nos propositions.

Dans nos simulations, nous avons évalué des métriques de performances telles que la consommation énergétique des nœuds (énergies consommées et énergies résiduelles), le nombre de paquets reçus par la station de base et le niveau de latence des paquets. Des comparaisons entre notre proposition et le protocole TunableMAC [79] ont été également faites en considérant les mêmes scénarios de simulation et en évaluant les mêmes métriques de performances. Les résultats de simulation ont montré que notre proposition donne de meilleures performances en termes de

consommation énergétique des nœuds, donc de durée de vie du réseau, en terme de nombre de paquets reçus par la station de base et en terme de nombre de paquets perdus par collisions.

#### 4.2 Description et calcul des paramètres de simulation

Les différents nœuds capteurs déployés dans la zone de surveillance sont placés selon notre modèle de placement présenté dans la section 3.3, en fonction de leurs coordonnées dans un champ de dimension 2D, de taille égale à  $200 \times 200 \text{ m}^2$ . Dans nos simulations, nous avons considéré différents scénarios réseaux dont la taille de chacun est respectivement égale à 40, 80, 120, 160, 200 en plus de la station de base (qui est le récepteur des paquets de données). Le type de module radio choisi est CC2420 [90] qui est très utilisé pour les RCSF. Les tableaux 7 et 8 montrent respectivement la matrice des temps de transitions (en ms) et celle des puissances de transitions (en mW) entre les différents états des capteurs pour ce type de module radio.

Tableau 7 : Matrice des temps de transitions (en ms) entre les différents états des capteurs

	<b>RX</b>	<b>TX</b>	<b>Sleep</b>
<b>RX</b>	-	0.01	0.194
<b>TX</b>	0.01	-	0.194
<b>Sleep</b>	0.05	0.05	-

Tableau 8 : Matrice des puissances de transitions(en mA) entre les différents états des capteurs

	<b>RX</b>	<b>TX</b>	<b>Sleep</b>
<b>RX</b>	-	62	62
<b>TX</b>	62	-	62
<b>Sleep</b>	1.4	1.4	-

Les différents paramètres de simulation et leurs valeurs sont décrits dans le tableau 10. Tous ces paramètres sont pris dans [79] et adaptés selon notre contexte. Cependant, le rayon de communication des capteurs est calculé en se basant sur la modélisation du canal sans fil décrite dans la section 3.2.2. Ce calcul est fait sur la base de deux paramètres qui sont la puissance d'émission TX\_Power (supposé égale pour tous les capteurs) et la perte moyenne de trajet en fonction de la distance  $PL(d_0)$ . Ensuite, le rayon de détection et la longueur du côté de la grille sont calculés à partir du rayon de communication en se basant sur nos hypothèses. Ces différents calculs sont présentés dans le paragraphe 4.2.1.

##### 4.2.1 Calcul des rayons de communication, de détection et de la longueur de la grille

Nous allons d'abord calculer le rayon de communication des capteurs. Pour ce faire, nous utilisons l'équation (3.4) présentée dans le paragraphe 3.2.2. D'après cette équation :

$$P_r = P_t - \left( PL(d_0) + 10\eta \text{Log} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X\sigma \right) \quad (4.1)$$

Dans l'équation (4.1), le paramètre „d“ représente le rayon de communication des capteurs. Donc, nous pouvons calculer d en fonction des autres paramètres de l'équation. D'après l'équation (4.1), nous avons :

$$\text{Log} \left( \frac{d}{d_0} \right) = \frac{P_t - P_r - PL(d_0) - X\sigma}{10\eta} \quad (4.2)$$

$$\Rightarrow \ln \left( \frac{d}{d_0} \right) = \left[ \frac{P_t - P_r - PL(d_0) - X\sigma}{10\eta} \right] * \ln(10) \quad (4.3)$$

$$\Rightarrow \frac{d}{d_0} = \exp \left( \left( \frac{P_t - P_r - PL(d_0) - X\sigma}{10\eta} \right) * \ln(10) \right) \quad (4.4)$$

$$\Rightarrow d = d_0 \exp \left( \left( \frac{P_t - P_r - PL(d_0) - X\sigma}{10\eta} \right) * \ln(10) \right) \quad (4.5)$$

$$\Rightarrow d = d_0 \left( 10^{\left[ \frac{P_t - P_r - PL(d_0) - X\sigma}{10\eta} \right]} \right) \quad (4.6)$$

Dans l'équation (4.6),  $P_t$  et  $P_r$  représentent respectivement la puissance d'émission et la puissance de réception. La puissance  $P_r$  est déterminée d'après [79] en fonction de la sensibilité du récepteur (ReceiverSensibility) et du paramètre NoiseFloor en utilisant l'équation (4.7).

$$P_r = \max(\text{ReceiverSensibility}, \text{NoiseFloor} + 5\text{dB}) \quad (4.7)$$

Le tableau 9 donne les différentes valeurs des paramètres qui nous permettent de calculer la valeur de d, c'est-à-dire la valeur du rayon de communication  $R_c$ .

Tableau 9 : Paramètres pour calculer le rayon de communication

Paramètres	Valeurs
TX_Power	0 dB
ReceiverSensibility	-95 dB
NoiseFloor	-100 dB
Perte de trajet exponentielle ( $\eta$ )	2.765
Perte de trajet moyenne initiale ( $PL(d_0)$ )	55
Distance de référence ( $d_0$ )	1m
Variable aléatoire Gaussienne ( $X_\sigma$ )	4.0

En utilisant les équations (4.6), (4.7) et en se basant sur les valeurs des paramètres du tableau 9, nous avons :

$d = 20.04 \approx 20$  m. Puisque  $d = R_c$ , alors :

$$R_c \approx 20 \text{ m} \quad (4.8)$$

D'après (4.8) et en se basant sur notre hypothèse selon laquelle le rayon de communication est le double du rayon de détection :

$$R_s = \frac{R_c}{2} \approx 10 \text{ m} \quad (4.9)$$

Enfin, d'après l'équation (4.9) et en se basant sur l'équation (3.20) (présentée dans la section 3.3) :

$$c = \frac{R_s}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7.07 \approx 7 \text{ m} \quad (4.10)$$

#### 4.2.2 Paramètres de simulation

L'ensemble des paramètres de simulation utilisés dans les évaluations de DSMAC sont répertoriés dans le tableau 10.



Tableau 10 : Paramètres de simulation et leurs valeurs

Paramètres	Valeurs
Dimension du terrain	200 × 200 m <sup>2</sup>
Nombre de nœuds considérés par scenario de simulation	40, 80, 120, 160, 200
Type de déploiement	Statique
Temps de simulation	400 s
Rayon de communication (R <sub>c</sub> )	~20 m
Rayon de détection (R <sub>s</sub> )	~10 m
Longueur du côté de la grille (c)	~7 m
Type de module radio	CC2420
Puissance de transmission	0 dB
Puissances consommées respectivement durant les états TX, RX et sleep	62 mW, 62 mW, 1.4 mW
Energie initiale	18720 J
Energie consommée par capture	0.02 mJ
Débit	250 kbps
Type de modulation	PSK
Bit par symbole	4
Bande passante	20 MHz
Noise Bandwidth	194 MHz
NoiseFloor	-100 dB
ReceiverSensibility	-95 dB
Perte de trajet exponentielle (η)	2.765
Perte de trajet moyenne initiale (PL(d <sub>0</sub> ))	55
Distance de référence (d <sub>0</sub> )	1 m
Variable aléatoire Gaussienne (X <sub>σ</sub> )	4.0
Application considérée	ThrouputTest [79]

Les nœuds capteurs sont placés en fonction de leurs coordonnées qui dépendent de la longueur de la grille. Par exemple, la figure 22 illustre la topologie de réseau pour 14 nœuds capteurs placés dans la zone d'intérêt selon notre modèle de placement pour une longueur de la grille égale à 7 m.

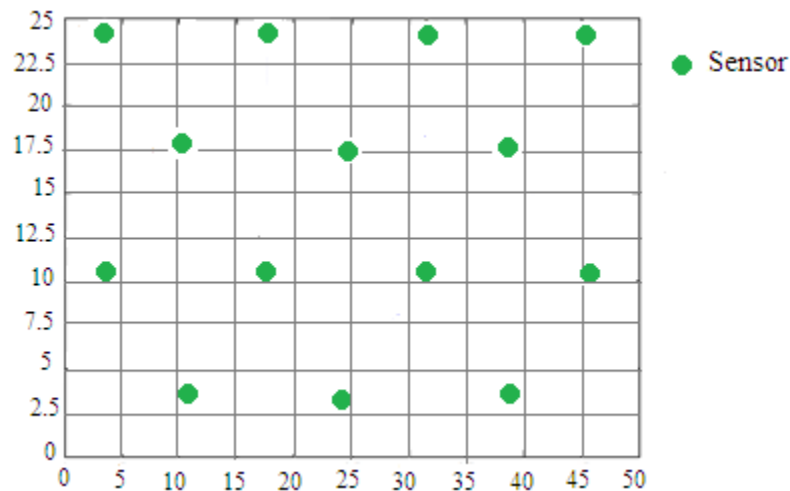


Figure 22 : Illustration de la topologie d'un réseau composé de 14 capteurs placés dans la zone d'intérêt selon notre modèle

### 4.3 Métriques d'évaluation des performances dans DSMAC

Dans nos simulations, nous avons utilisé une application disponible dans le simulateur Castalia appelée "ThroughputTest" [79]. Cette application permet aux nœuds capteurs d'envoyer des paquets de taille constante ayant chacun une charge égale à 2000 octets. Ces paquets capturés par les différents nœuds capteurs du réseau sont envoyés à la station de base avec un taux d'envoi de 5 paquets par seconde. Les métriques de performances évaluées sont l'énergie moyenne consommée, l'énergie moyenne résiduelle, le nombre de paquets reçus par la station de base et le niveau de latence moyenne des paquets.

Après les évaluations de ces différentes métriques, des comparaisons entre DSMAC et le protocole TunableMAC sont faites en considérant les mêmes scénarios de simulation et en évaluant les mêmes métriques de performances. Les différents résultats des évaluations sont présentés dans la section 4.4.

### 4.4 Evaluation des performances de DSMAC

#### 4.4.1 Evaluation de la consommation énergétique dans DSMAC

Les figures 23 et 24 montrent respectivement l'énergie moyenne consommée en Joules (J) et l'énergie moyenne résiduelle (en J) en fonction du nombre de nœuds dans DSMAC et dans le protocole TunableMAC. Sur chacune de ces figures, le nombre de nœuds est représenté sur l'axe des abscisses et les énergies moyennes (respectivement énergies consommées et énergies résiduelles) sur l'axe des ordonnées.

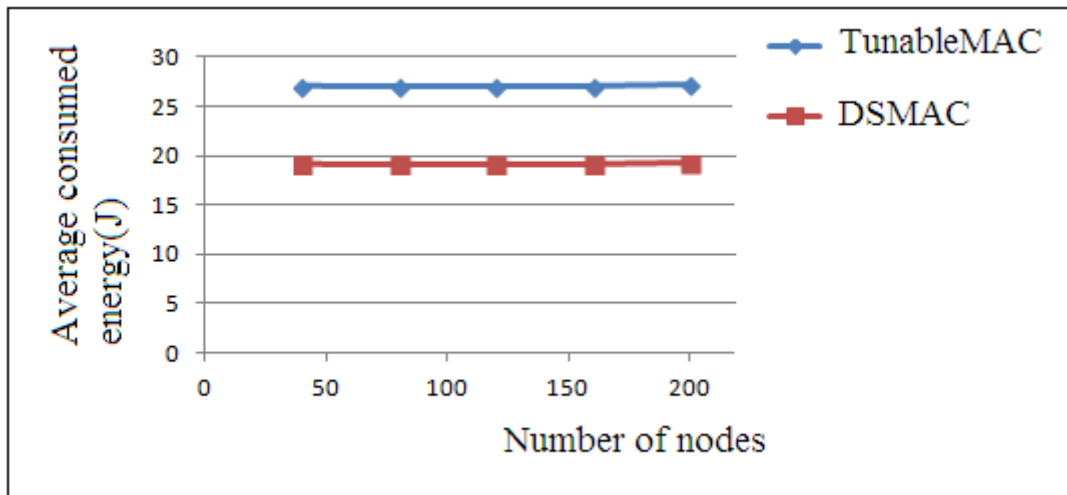


Figure 23 : Evaluation de l'énergie consommée entre DSMAC et TunableMAC

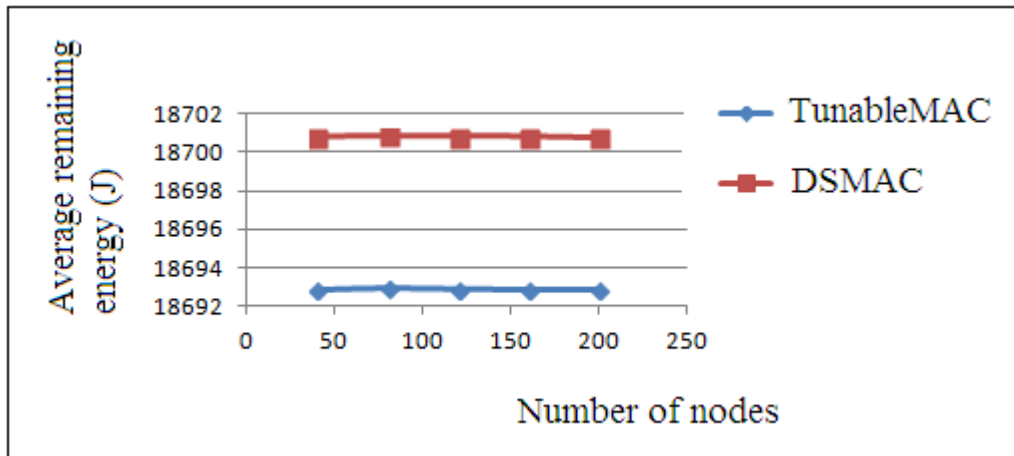


Figure 24 : Evaluation de l'énergie résiduelle entre DSMAC et TunableMAC

Comme illustrés sur les figures 23 et 24, les performances de DSMAC en terme de consommation énergétique sont largement supérieures à celles du protocole TunableMAC. En effet, l'énergie moyenne consommée dans l'ensemble du réseau est à égale à 19.18 J (respectivement 27.09 J) pour DSMAC (respectivement pour TunableMAC). Ainsi, dans DSMAC, les nœuds capteurs peuvent économiser jusqu'à 30% de leur énergie par rapport au protocole TunableMAC. Les performances de DSMAC peuvent être expliquées par le fait que dans cet algorithme, seule une partie des nœuds du voisinage d'une source donnée (voisinage lointain) sont réveillés pour relayer les paquets transmis par cette source contrairement au protocole TunableMAC où l'ensemble des nœuds du voisinage d'une source donnée sont réveillés afin de participer tous au routage de cette source. Dans DSMAC, les autres nœuds du voisinage d'une source ne sont pas réveillés (voisins proches) et ces derniers vont sauvegarder d'avantage leurs énergies. La réduction significative de la consommation énergétique durant toutes les phases de communication (TX et RX) dans l'ensemble du réseau a

pour conséquence l'amélioration de la durée de vie des capteurs, donc du réseau global. Ainsi, avec DSMAC, la durée de vie du réseau peut être nettement améliorée relativement au protocole TunableMAC. En outre, la couverture complète de la zone de surveillance et la connectivité optimale du réseau sont également garanties dans DSMAC à tout moment de la durée de vie du RCSF.

#### 4.4.2 Evaluation du nombre de paquets reçus par la station de base dans DSMAC

La figure 25 illustre le nombre de paquets reçus par la station de base en fonction de la taille du réseau DSMAC et dans TunableMAC. Le nombre de paquets reçus par la station de base et la taille du réseau sont respectivement représentés sur l'axe des ordonnées et sur celui des abscisses. En regardant cette figure, nous voyons DSMAC dépasse TunableMAC en terme de nombre de paquets reçus par la station de base. Ceci peut être expliqué par le fait DSMAC diminue significativement le nombre paquets qui rentrent en collisions dans l'ensemble du réseau, augmentant ainsi le débit de réception des paquets.

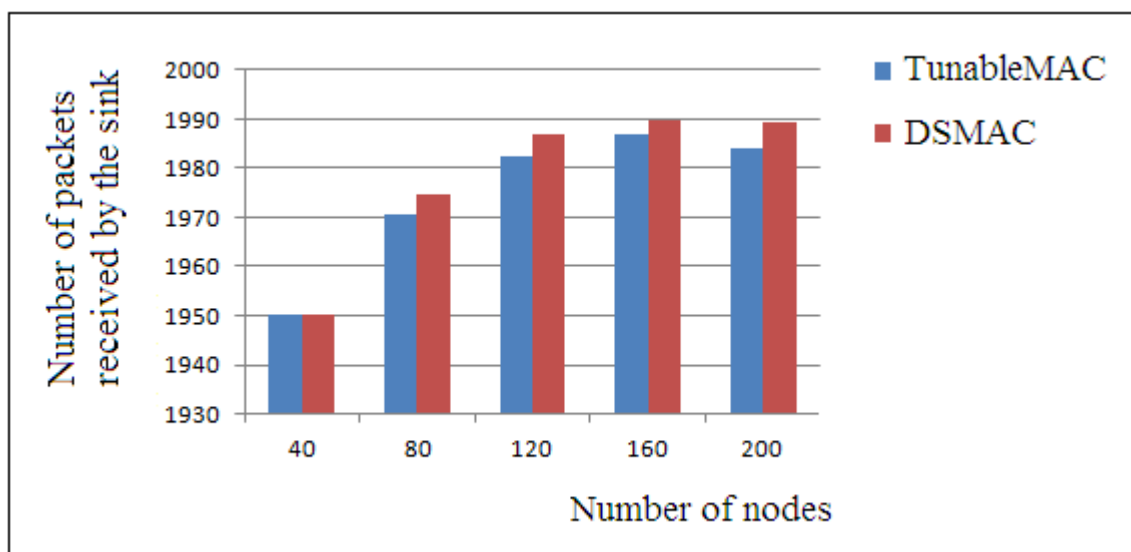


Figure 25 : Evaluation du nombre de paquets reçus par la station de base entre DSMAC et TunableMAC

#### 4.4.4 Evaluation du niveau de latence des paquets dans DSMAC

Enfin, la figure 26 montre le niveau de latence moyenne des paquets (en ms) en fonction de la taille du réseau dans DSMAC et dans TunableMAC. Le niveau de latence moyenne est représenté sur l'axe des ordonnées et la taille du réseau (nombre de nœuds) est représentée sur l'axe des abscisses.

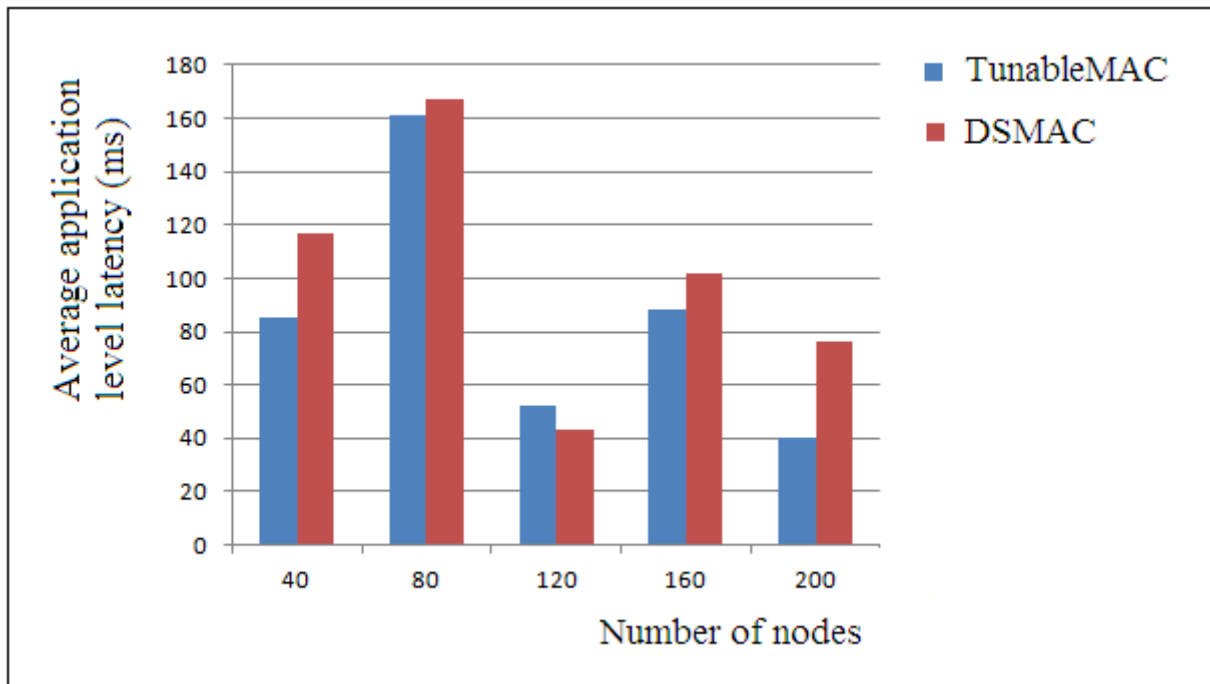


Figure 26 : Evaluation du niveau de latence des paquets entre DSMAC et TunableMAC

Comme illustré sur la figure 26, les performances de DSMAC en terme de latence sont légèrement inférieures à celles du protocole TunableMAC. En effet, le niveau de latence moyenne des paquets est égal à 104.2 ms (respectivement à 86.4 ms) pour DSMAC (respectivement pour TunableMAC). Ainsi, nous avons une différence de 17.8 ms. Cependant, un seuil de niveau de latence égal à 169 ms est raisonnable pour la quasi-totalité des applications des RCSF dans la mesure où ces applications n'ont pas généralement des exigences strictes en termes de latence. Par exemple les applications telles que la surveillance critique de zone, le monitoring de l'habitat et l'agriculture intelligente, ont plutôt des exigences en termes de consommation énergétique, de couverture complète de la zone d'intérêt et de connectivité du réseau.

#### 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait les évaluations de notre proposition par des simulations. En plus, nous avons comparé les performances de DSMAC avec celles du protocole TunableMAC. Les résultats de simulations ont montré que DSMAC dépasse largement TunableMAC en termes de consommation énergétique, donc de durée de vie du réseau et en terme de nombres de paquets reçus par la station de base. Ainsi, nous pouvons dire que notre proposition est efficace en terme de durée de vie du réseau, et de débit de réception des données par la station de base.

En plus, avec nos propositions, une couverture complète de la zone d'intérêt et une connectivité du RCSF sont assurées en même temps qu'une amélioration de la durée de vie du réseau de l'ordre de 30% par rapport au protocole TunableMAC.

## Chapitre 5 : Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre, nous concluons la thèse en donnant une synthèse de nos différents travaux effectués et les perspectives envisageables au terme de nos recherches.

### 5.1 Synthèse

Dans cette thèse, avons abordé la problématique d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF en prenant en compte deux contraintes fondamentales qu'exigent certaines classes d'applications de ces réseaux. Ces classes d'applications des RCSF sont la surveillance de zone critique, l'agriculture intelligente et le monitoring de l'habitat. Ces deux contraintes qui sont liées à la couverture complète de la zone de surveillance et à la connectivité du réseau sont non seulement complémentaires dans ces applications. Notre objectif principal est de proposer des mécanismes efficaces pour l'optimisation de la durée de vie dans les RCSF, tout en satisfaisant aux contraintes citées ci-dessus. Pour atteindre cet objectif, nous avons dans un premier temps donné un état de l'art des travaux proposés portant sur la résolution de ces problématiques. Cependant, la revue de cet état de l'art nous a permis de conclure qu'il reste encore des problématiques ouvertes dans ce domaine.

### 5.2 Contributions

Nos contributions concernent deux niveaux afin de prendre en compte toutes les caractéristiques et les exigences de certaines classes d'applications des RCSF. Ces niveaux sont :

- *le placement des nœuds capteurs*: nous avons mis en place une méthode de placement déterministe des nœuds dans la zone d'intérêt qui a non seulement permis de réduire le nombre de capteurs nécessaires pour couvrir toute une zone de surveillance donnée, mais qui a également permis d'assurer une connectivité optimale du réseau. Cette connectivité optimale du RCSF a comme conséquence directe l'existence d'une topologie de routage optimale dans ce réseau, ce qui garantit une transmission efficace des données capturées.
- *l'ordonnement des nœuds capteurs* : nous avons mis en œuvre une stratégie d'ordonnement distribuée des états des capteurs afin de réduire la consommation énergétique dans l'ensemble du réseau tout en sauvegardant les contraintes de couverture et de connectivité obtenues grâce à notre modèle de placement. L'optimisation de la

consommation énergétique dans l'ensemble du réseau a comme conséquence l'amélioration de la durée de vie de celui-ci. Par ailleurs, cette stratégie d'ordonnement qui exploite les propriétés géométriques de notre modèle de placement est basée sur les techniques de duty cycle. Elle a permis d'améliorer des propositions existantes surtout en termes de durée de vie et du nombre de paquets reçus par la station de base. En même temps, une couverture complète de la zone de surveillance et une connectivité du RCSF sont garanties par nos propositions.

Ainsi, nos propositions sont adaptées et peuvent être utilisées par des applications des RCSF qui exigent une durée de vie du réseau optimisée sous des contraintes de couverture complète de la zone d'intérêt et de connectivité du réseau.

### 5.3 Perspectives

Comme perspectives de travail, nous nous fixons :

- D'introduire de nouveaux modèles beaucoup plus réalistes pour les communications sans fil, qui permettent de prendre en compte les variations temporelles du canal. En effet, les communications dans les RCSF sont souvent affectées par les variations temporelles du canal de propagation, causées généralement par les phénomènes d'atténuation du signal, le multi-trajet, le retard de phase, etc. Il existe plusieurs modèles analytiques qui permettent de décrire et d'étudier les variations temporelles du canal de propagation. Nous pouvons citer entre autres les modèles asymptotiques en fréquence et les modèles statistiques. Il existe aussi des modèles empiriques qui sont utilisés dans l'étude de ces variations temporelles. Nous comptons ainsi étudier tous ces modèles afin de choisir ceux qui conviennent le mieux dans la modélisation des variations temporelles du canal, et si nécessaire de proposer d'autres modèles hybrides.
- De proposer de nouveaux algorithmes de routage pour les RCSF qui sont économes en énergie. Nous avons fait une étude comparative sur un ensemble de protocoles de routage qui sont généralement utilisés dans les RCSF. Cependant, nous avons remarqué que beaucoup d'algorithmes de routage n'exploitent pas de façon optimale les propriétés de couverture de la zone et celles de connectivité du réseau. Ainsi, nous comptons mettre en œuvre de nouveaux algorithmes de routage qui sont économes en énergie, et qui exploitent de façon optimale les propriétés de couverture et de connectivité dans les RCSF.

- D'adapter notre modèle de placement à la morphologie du terrain de déploiement. En effet, certaines zones de déploiement des nœuds capteurs peuvent avoir des obstacles. Etant donné que notre modèle de placement vise dans un premier temps un placement optimal des nœuds, qui puisse garantir une couverture complète de la zone d'intérêt et une connectivité optimale du réseau, il est nécessaire d'étudier tous les aspects qui peuvent influencer sur le placement des nœuds et en particuliers les obstacles.
- De mettre en place une couche MAC auto-adaptative pour permettre une auto-organisation logique des nœuds capteurs afin de garantir une couverture complète de la zone de surveillance, ainsi qu'une connectivité optimale du réseau, à chaque changement de topologies du RCSF.



## Liste des figures

Figure 1 : Exemple d'un réseau de capteur sans fil .....	17
Figure 2 : Les composants de base d'un nœud capteur sans fil [1] .....	17
Figure 3 : Exemple de capteur intelligent MICA2 de Crossbow[17] .....	19
Figure 4: Exemple d'un système de monitoring cardiaque d'AliveCore avec capteur biométrique et application pour iPhone [81].....	21
Figure 5: Quelques exemples d'illustrations d'applications des RCSF [15] .....	23
Figure 6: Exemple d'un RCSF fonctionnant selon un mode d'architecture à plat .....	24
Figure 7: Exemple d'un RCSF fonctionnant selon une architecture hiérarchique en clusters .....	25
Figure 8: Modèle en couche pour la communication dans les RCSF [5] .....	26
Figure 9: Pile IEEE 802.15.4/ZigBee[7].....	30
Figure 10 : Diagramme de transition entre les différents états d'activités d'un nœud capteur.....	38
Figure 11 : Exemple d'illustration de la couverture simple .....	41
Figure 12 : Exemple d'illustration du mécanisme de couverture multiple (k-couverture).....	42
Figure 13: Illustration de points k-couvert.....	42
Figure 14: Couverture de zone par ordonnancement des états des capteurs.....	43
Figure 15: Classification des techniques de conservation d'énergie dans les RCSF [37] .....	54
Figure 16: Exemple d'illustration du modèle de réseau .....	70
Figure 17 : Illustration du modèle du disque unitaire .....	72
Figure 18: Exemple d'illustration d'une topologie de k-connectivité ( $k \geq 4$ ) .....	77
Figure 19 : Illustration du modèle de consommation énergétique [34] .....	78
Figure 20: Modèle de placement géométrique des nœuds.....	80
Figure 21: Illustration des coordonnées des voisins (proches et lointains) du capteur $S_7$ .....	94
Figure 22 : Illustration de la topologie d'un réseau composé de 14 capteurs placés dans la zone d'intérêt selon notre modèle.....	105
Figure 23 : Evaluation de l'énergie consommée entre DSMAC et TunableMAC.....	106
Figure 24 : Evaluation de l'énergie résiduelle entre DSMAC et TunableMAC .....	106
Figure 25 : Evaluation du nombre de paquets reçus par la station de base entre DSMAC et TunableMAC.....	107
Figure 26 : Evaluation du niveau de latence des paquets entre DSMAC et TunableMAC .....	108

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des protocoles de routage de RCSF .....	52
Tableau 2 : Comparaison des approches de conservation d'énergie dans les RCSF .....	56
Tableau 3 : Comparaison des protocoles MAC basés sur le duty cycle.....	64
Tableau 4 : Comparaison des techniques d'optimisation de la durée de vie dans les RCSF sous contraintes de couverture et de connectivité .....	65
Tableau 5 : Exemples de classes fréquentes de complexité .....	88
Tableau 6 : Exemples de temps de calculs pour quelques classes de complexités .....	89
Tableau 7 : Matrice des temps de transitions (en ms) entre les différents états des capteurs .....	101
Tableau 8 : Matrice des puissances de transitions(en mA) entre les différents états des capteurs ..	101
Tableau 9 : Paramètres pour calculer le rayon de communication.....	103
Tableau 10 : Paramètres de simulation et leurs valeurs .....	104

## Abbreviation

**ACK** ACKnowledgement

**ADC** Analog to Digital Converter

**AODV** Ad hoc On Demand Routing Vector

**API** Application Programming Interface

**APTEEN** Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol

**ASCII** American Standard Code for Information Interchange

**BAN** Body Area Network

**BER** Bit Error Rate

**BI** Beacon Interval

**BPSK** Binary Phase Shift Keying

**BS** Base Station

**CAP** Contention Access Period

**CCP** Coverage Configuration Protocol

**CDMA** Code Division Multiple Access

**CFP** Contention Free Period

**CH** Cluster Head

**CPU** Central Processing Unit

**CSMA-CA** Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

**CTS** Clear To Send

**DARPA** Defense Advanced Research Projects Agency

**dB** decibel

**DD** Directed Diffusion

**DNS** Domain Name System

**DSMAC** Distributed Scheduling Medium Access Control algorithm

**DSN** Distributed Sensor Network

**DSSS** Direct Sequence Spread Spectrum

**FC** Fréquence de Coupure

**FFD** Full Function Device

**GRTC** Groupe de Recherche en Réseaux et Télécommunication de Colmar

**GTS** Garanted Time Slot

**HEED** Hybrid Energy Efficient Distributed Clustering

**HT** Hard Threshold

**ICMP** Internet Control Message Protocol

**ID** Identifiant d'un nœud capteur

**IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**IETF** Internet Engineering Task Force

**IP** Internet Protocol

**IPv4** Internet Protocol version 4

**IPv6** Internet Protocol version 6

**J** Joule

**Kbps** Kbit/s

**LAN** Local Area Network

**LEACH** Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

**LTE** Long term for Evolution

**MAC** Medium Access Control

**MANET** Mobile Ad hoc Network

**MHz** Mega Hertz

**MIPS** laboratoire Modélisation, Intelligence, Processus et Systèmes

**mW** miliWatt

**NAM** Network Animator

**NED** Network Description

**NS2** Network Simulation version 2

**NS3** Network Simulation version 3

**OFF** Module radio d'un capteur dans le mode éteint

**OLSR** Optimized Link State Routing Protocol

**OMNET** Objective Modular Network Testbed

**ON** Module radio d'un capteur dans le mode allumé

**OQPSK** Offset Quadrature Phase-Shift Keying

**OPNET** Optimized Network Engineering Tool

**OS** Operating System

**OSI** Open System Interconnection

**PEGASIS** Power Efficient GATHERing Sensor Information System

**PHY** Couche Physique

**PN** Pseudo-random Noise

**PSK** Phase Shift-Keying

**QoS** Quality of Service

**RCSF** Réseau de Capteur sans Fil  
**RFD** Reduced Function Device  
**RR** Rumour Routing  
**RSSI** Received Signal Strength Indicator  
**RTS** Request To Send  
**RX** Etat de réception du module radio d'un capteur  
**SAR** Sensor Aggregate Routing  
**SensorSim** Sensor Simulator  
**SINR** Signal-to-Interference Noise Ratio  
**SOS** Sensor Operating System  
**SPIN** Sensor Protocol for Information via Negotiation  
**SQL** Socket Query Language  
**ST** Soft Threshold  
**TCL** Tool Command Language  
**TCP** Transmission Control Protocol  
**TDMA** Time Division Multiple Access  
**TEEN** Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol  
**TinyOS** Tiny Operating System  
**TTL** Time To Live  
**TX** Etat de Transmission du module radio d'un capteur  
**UCAD** Université Cheikh Anta Diop de Dakar  
**UDP** User Datagram Protocol  
**UFR** Unité de Formation et de Recherche  
**UHA** Université de Haute Alsace  
**WCS** Wireless Camera Sensor  
**WiFi** Wireless Fidelity  
**WiMax** Worldwide Interoperability for Microwave Access  
**WPAN** Wireless Personal Area Network  
**WSN** Wireless Sensor Network  
**2D** Espace à deux dimensions  
**3D** Espace à trois dimensions  
**6LoWPAN** IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks

## **Publications**

### **1. Conférence internationale avec comité de lecture**

D. Ngom, P. Lorenz and B. Gueye, “*A Distributed Scheduling Algorithm to Improve Lifetime in Wireless Sensor Network based on Geometric Placement of Sensors with Coverage and Connectivity Constraints*”, Ninth International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM’15, August 23-28, 2015, Venice, Italy, ISBN: 978-1-61208-425-1, pp. 57-63 (*Best Paper Award*).

### **2. Journal international avec comité de lecture**

D. Ngom, P. Lorenz and B. Gueye, “*A MAC Scheduling Algorithm for Optimizing the Network Lifetime in Wireless Sensor Networks Based on Coverage and Connectivity Constraints*”, Sensors & Transducers Journal, Volume 194, Issue 11, November 2015, IFSA, ISSN: 2306-8515, pp. 1-14.

### **3. Colloque National**

D. Ngom, B. Gueye and P. Lorenz, “*DSMAC: Constraints-based Coverage and Connectivity for Optimizing the Network Lifetime in Wireless Sensor Networks*”, CNRIA (Colloque National sur la Recherche en Informatique et ses Applications), 28-31 Octobre 2015, Thiès, Sénégal, pp. 16-20.

## Annexe

Le code ci-dessous est un extrait des scénarios de simulations de notre proposition (DSMAC). Il décrit le fichier de configuration principal *omnetpp.ini* dans lequel, on définit les différents paramètres de simulation (temps de simulation, nombre de nœuds, type de déploiement, paramètres du canal sans fil, type de module radio, paramètres des couches PHY, MAC, routage, applications, etc.).

```
#####  
#Configuration files of MAC module (DSMAC) for simulation scenarios WSN Diery NGOM  
#####  
#=====  
[General]  
#=====  
#we include the main Castalia.ini file  
include ../Parameters/Castalia.ini  
  
#we define the simulation time and we set it to 400 s  
sim-time-limit = 400 s  
  
#we define field size and we set it to 200m×200m  
SN.field_x = 200  
SN.field_y = 200  
  
#we test a scenario which include 15 nodes deployed manually with their coordinate in the monitored region  
SN.numNodes = 15  
  
#we set the parameters of the wireless channel  
SN.wirelessChannel.onlyStaticNodes = true  
SN.wirelessChannel.bidirectionalSigma = 0  
SN.wirelessChannel.pathLossExponent = 2.765  
  
#we choose a radio type and we set the TX power to 0 dB. In so doing, we have chosen the radio CC2420 with others  
#default parameters. The value of the TX power which is set to 0 dB enables to compute the communication range. So  
#that, the value of the communication range is equal to 20 m and the sensing range is determined based to our  
#assumptions and is equal to 10 meters. Finally, the grid range which determines the value of each sensor coordinate is  
#equal to 7 m. We set also the initial energy for all sensor nodes which is equal to 18720 Joules corresponding of 2  
#piles AA.  
SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/CC2420.txt"
```

```
SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"  
SN.node[*].ResourceManager.initialEnergy = 18720
```

*#we set packets parameters and define their maximum size in each layer of the communication stack. On the other hands, in our scenarios test, we used big data packets of size 2000 byte(2 Kb).*

```
SN.node[*].Communication.Routing.maxNetFrameSize = 2500  
SN.node[*].Communication.MAC.maxMACFrameSize = 2500  
SN.node[*].Communication.Radio.maxPhyFrameSize = 2500
```

*#we choose the application test used and set its parameters. We use an application called "ThroughputTest". This application enable the sensors to send constant data payload of 2000 byte packet with a rate of 5 packets per second to the base station (node 0) which is the only receiver of application packets according to many WSN applications.*

```
SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"  
SN.node[*].Application.packet_rate = 5  
SN.node[*].Application.constantDataPayload = 2000
```

*#we collect the trace info application for the receiver (node 0), and the trace info for MAC layer and for the resource manager for all nodes. So that the collectTraceInfos turned on for node 0 and all other nodes to show some interesting patterns (trace for application, MAC layer information, energy consumption, etc.).*

```
SN.node[0].Application.collectTraceInfo = true  
SN.node[*].Communication.MAC.collectTraceInfo = true  
SN.node[*].SensorManager.collectTraceInfo = true
```

*#we define the position of nodes specified by their (x, y) coordinates. The sink (node 0) is placed in the center of the field which is the position (100, 100). We choose this position for the sink because it's the optimal position. We placed the sensor nodes according to our placement model described in section 3.3. In our DSMAC proposal, we have run four simulation scenarios with respectively 40, 80, 120, 160, and 200 sensor nodes that send their packets to a given Sink. Note that, we don't show here the entire sensor nodes considered in our different simulation scenarios. This is extract code composed of 15 nodes (14 sensor nodes plus the sink node).*

```
SN.node[0].xCoord = 100  
SN.node[0].yCoord = 100  
SN.node[1].xCoord = 3.5  
SN.node[1].yCoord = 10.5  
SN.node[2].xCoord = 3.5  
SN.node[2].yCoord = 24.5  
SN.node[3].xCoord = 10.5  
SN.node[3].yCoord = 3.5  
SN.node[4].xCoord = 10.5  
SN.node[4].yCoord = 17.5  
SN.node[5].xCoord = 17.5  
SN.node[5].yCoord = 10.5  
SN.node[6].xCoord = 17.5
```



```
SN.node[6].yCoord = 24.5
SN.node[7].xCoord = 24.5
SN.node[7].yCoord = 3.5
SN.node[8].xCoord = 24.5
SN.node[8].yCoord = 17.5
SN.node[9].xCoord = 31.5
SN.node[9].yCoord = 10.5
SN.node[10].xCoord = 31.5
SN.node[10].yCoord = 24.5
SN.node[11].xCoord = 38.5
SN.node[11].yCoord = 3.5
SN.node[12].xCoord = 38.5
SN.node[12].yCoord = 17.5
SN.node[13].xCoord = 45.5
SN.node[13].yCoord = 10.5
SN.node[14].xCoord = 45.5
SN.node[14].yCoord = 24.5
```

*#we choose the routing protocol. For the entire nodes we used a default routing mechanism define in Castalia which is called MultipathRingsRouting. We set also the parameter Communication.Routing.isSink to "true" in the sink node to specify that node 0 is the only receiver of the entire data packets send by other sensor nodes.*

```
SN.node[*].Communication.RoutingProtocolName = "MultipathRingsRouting"
SN.node[*].Communication.Routing.netBufferSize = 512
SN.node[*].Communication.Routing.netDataFrameOverhead = 0
SN.node[*].Communication.Routing.collectTraceInfo = true
SN.node[*].ResourceManager.sigmaCPUClockDrift = 0
SN.node[*].MobilityManagerName = "NoMobilityManager"
SN.node[0].Communication.Routing.isSink = true
```

*#we choose the MAC protocols used and we configure their parameters. We used two MAC protocol: TunableMAC and DSMAC (which is our proposition). After, we compare these two protocols in term of energy consumption, number of packets received by the sink node, number of packets failed with interferences dues to the collisions, application level latency. Note that, we consider the same scenarios and the same parameters for these two MAC protocols*

```
[ConfigTunableMAC]
SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "TunableMAC"
SN.node[*].Communication.MAC.collisionResolution = 0
SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"
SN.node[*].Communication.MAC.randomTxOffset = 0
SN.node[*].Communication.MAC.backoffType = 2
SN.node[*].Communication.MAC.macBufferSize = 1024
```

*[Config DSMAC]*

*SN.node[\*].Communication.MACProtocolName = "DSMAC"*

*SN.node[\*].Communication.MAC.collisionResolution = 0*

*SN.node[\*].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"*

*SN.node[\*].Communication.MAC.randomTxOffset = 0*

*SN.node[\*].Communication.MAC.backoffType = 2*

*SN.node[\*].Communication.MAC.macBufferSize = 1024*

## Bibliographie

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks : a survey", in *Computer Networks (Elsevier)*, vol. 38, No. 4, 2002, pp. 393-422.
- [2] <http://www.businessweek.com/datedtoc/1999/9935.htm>. 21 ideas for the 21st century
- [3] C.Y. Chong and S. P. Kumar , "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges", in *Proceedings of the IEEE*, 2003, vol. 91, No.8, pp. 1247-1256.
- [4] M. Lehsaini, "Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique, Thèse de Doctorat, Université A.B Tlemcen Faculté des Sciences pour l'Ingénieur & Université de Franche-Comté", *UFR Sciences et Techniques, École Doctorale SPIM, Spécialité Informatique, soutenu en 2009*.
- [5] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks", in *IEEE Communications Magazine, Atlanta, USA, 2002, vol. 40, No. 8*, pp. 102-114.
- [6] Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., "IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems -Local and Metropolitan Area Networks-specific Requirements-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN)", *USA 1 October 2003*.
- [7] "ZigBee specification - Document 053474r17", ZigBee Alliance, *January 2000*,  
[Online] : <http://www.zigbee.org>
- [8] P. Levis, "TinyOS Programming manual", *27 October 2006*.  
[Online] : <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/pdf/tinyos-programming.pdf>
- [9] D. Gay, P. Levis, D. Culler, and E. Brewer, "nesC 1.1 Language Reference Manual", *May 2003*, pp. 1-27.
- [10] A. Dunkels, B. Gronval, and T. Voigt, "Contiki-A: Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors", in *Proceedings of the 29<sup>th</sup> annual IEEE International Conference on Local Computer Network*, November 2004, pp. 455-462.
- [11] A. Dunkels, F. O. Sterlind, and Z. He, "An adaptive communication architecture for wireless sensor networks", in *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International conference on Embedded networked sensor systems (SenSys' 07)*, New York, NK, USA, 2007, pp. 335-349.

- [12] A. Dunkels, “Full TCP/IP for 8 bit architecture”, in *proceedings of First ACM/Usenix International conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys'03)*, San Francisco, USA, 2003, pp. 85-98.
- [13] S. Bhatti, J. Carlson, H. Dai, J. Deng, J. Rose, A. Sheth, B. Shucker, C. Gruenwald, A. Torgerson, and R. Han “MANTIS OS: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Platforms”, in *Journal Mobile Networks and Applications, Special Issue on Wireless Sensor Networks, 2005, Vol.10, Issue 4*, pp. 563-579.
- [14] C-C. Han, R. Kumar, R. Shea, E. Kohler, and M. Srivastava, “A Dynamic Operating System for Sensor Nodes”, in *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys'05)*, New York, NY, USA, 2005, pp.163-176.
- [15] B. Amira, “Thèse de Doctorat 3ème Cycle LMD intitulée Prolongation de la Durée de Vie des Batteries dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil”, *Faculté des Sciences de l'ingénierat, Département d'Informatique, Université de Badji Mokhtar-Annaba, soutenu en 2015*.
- [16] W. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, “Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks”, In *the 5<sup>th</sup> annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, August 1999*, pp. 174-185.
- [17] CrossBow. Sensor Boards.  
 [Online] : <https://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=158>
- [18] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, “Direct Diffusion: A Scalable and robust communication paradigm for sensors network”, in *Proceedings ACM MobiCom'00, Boston MA, August 2000*, pp. 56-67.
- [19] C. Antanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heideman, and F. Silva, “Direct Diffusion for sensor networking”, in *IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 11, No. 1, 2003*, pp. 2-16.
- [20] D. Braginsky and D. Estrin, “Rumor Routing Algorithm for sensor network”, in *the approach of the first workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Atlanta GA, Octobre 2002*.
- [21] Y. Yao and J. Gehrke, “The cougar approach to in-network query proceeding in sensor network”, in *SIGMOD, September 2002*.
- [22] W. Akkaria, B. Bouhdida, and A. Belghithb, “LEATCH: Low Energy Adaptive Tier Clustering Hierarchy”, in *the 6th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, 2015*, pp. 365-372.

- [23] S. Lindsey and C. S. Raghavendra, "PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems", in *IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002, Vol. 3*.
- [24] S. Lindsay, C. S. Raghavendra, and K. M. Sivalingam, "Data Gathering in Sensor Networks using the Energy Delay Metric", in *IEEE Computer Society, 15<sup>th</sup> International Parallel & Distributed Processing Symposium, USA, April 2001*, pp. 188.
- [25] E. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks", in *Proceedings of 15<sup>th</sup> International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2001*, pp. 2009-2015.
- [26] E. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks", in *IPDPS'02, 16<sup>th</sup> International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2003*, pp. 48.
- [27] O. Younis and S. Fahmy, "Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks", in *IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004*, pp. 366-379.
- [28] Q. Fang, F. Zhao, and L. Guibas, "Lightweight Sensing and Communication Protocols for Target Enumeration and Aggregation", in *the 4<sup>th</sup> ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2003), June 2003*, pp. 165-176.
- [29] A. Giridhar and P. Kumar, "Maximizing the functional lifetime of sensor networks", in *proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Information Proceeding in Sensor Network (IPSN), 2005*, pp. 13-19.
- [30] Y. Chen and Q. Zhao, "On the Lifetime of Wireless Sensor Networks", in *IEEE Communication letters, Vol. 9, No. 11, November 2005*, pp. 976-978.
- [31] M. Esseghir, N. Bouabdallah, and G. Pujolle, "A Novel Approach for Improving Wireless Sensor Network Lifetime", in *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005*, pp. 2701-2706.
- [32] Z. Hu and B. Li, "On the fundamental capacity and lifetime limits of energy-constrained wireless sensor networks", in *Proceedings of 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2004*.
- [33] R. Verdone, D. Dardari, G. Mazzini, and A. Conti, "Wireless Sensor and Actuator Networks Technologies, Analysis and Design", *London, UK, Elsevier, 2008*.
- [34] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks", in *proceedings of the Hawaii International Conference on System Science, vol. 8, January 2000*, pp. 1-10.

- [35] M. Younis and T. Nadeem, “Energy efficient MAC protocols for wireless sensor Networks”, in *Technical report, university of Mryland baltimre County, USA*, 2004.
- [36] S. Moad, “Optimisation de la consommation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil”, *Rapport Master 2 de Recherche en Informatique Université Rennes*, 2008, pp. 1-50.
- [37] M. Ilyas and I. Mahgoub, “Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems”, in *CRC Press, Boca Raton*, 2005.
- [38] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min, and M. L. Sichitiu, “Z-MAC: a hybrid MAC for sensor networks”, in *proceeding IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, pp. 511-524.
- [39] S. Poduri1 , S. Patter, B. Krishnamachari, and G. Sukhatme, “A unifying framework for tunable topology control in sensor”, in *Center for Robotics and Embedded Systems, CRES-05-004*, 2005, pp. 1-15.
- [40] I. Khou, P. Minet, A. Laouiti, and S. Mahfoudh, “Survey of Deployment Algorithms in Wireless Sensor Networks: Coverage and Connectivity Issues and Challenges”, in *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, 2014, pp. 1-24.
- [41] T. H. Lai, “Coverage and Connectivity Issues in Sensor Network”, *Ohio State University*, 2005.
- [42] Z. Zhou, S. Das, and H. Gupta, “Connected K-Coverage Problem in Sensor Network”, in *Proceedings of the International Conference on Computer Communications and Networks (IC3N)*, 2004.
- [43] B. Wang, “Coverage Problems in Sensor Networks: A survey”, in *ACM Computing Surveys* 43, 2011, pp. 1-56.
- [44] S. Mnasri, N. Nasri et T. Val, “Contribution au déploiement optimisé des réseaux de capteurs sans fil”, dans *Journées Nationales des Communications Terrestres (JNCT)*, 2014, pp. 2-13.
- [45] X. Cheng, DZ Du, L. Wang, and B. Xu, “Relay sensor placement in wireless sensor networks”, in *ACM/Springer Journal of Wireless Networks*, 2008, pp. 347-355.
- [46] M. Younis and K. Akkaya, “Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey”, in *Ad Hoc Networks* 6, 2008, pp. 621-655.
- [47] B. Sahraoui, “La géolocalisation dans les réseaux de capteurs sans fil”, *Mémoire de fin d’études cycle ingénieur d’état en Informatique*, 2011, pp. 10-15.
- [48] M. C. Akewar and N. V. Thkur, “Study of Wireless Sensor Network Deployments”, in *International Journal of Computer and Communication*, 2012, vol. 2, No. 4, pp. 533-541.

- [49] G. Xing, X. Wang, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, and C. Gill, “Integrated coverage and connectivity for energy conservation in sensor networks”, in *Journal ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 1, Issue 1, August 2005, pp. 36-72.
- [50] P. Ankur, and M. A. Rizvi, “Analysis of Strategies of Placing Nodes in Wireless Sensor Networks”, in *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, Vol. 4, Issue 2, February 2014, pp. 398- 402.
- [51] S. H. Khasteh, S. B. Shouraki, N. Hajiabdorahim, E. Dadashnialehi, “A new approach for integrated coverage and connectivity in wireless sensor networks”, in *Journal Computer Communications*, 2012, pp. 113-120.
- [52] X. Wang, G. Xing, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, and C. Gill, “Integrated Coverage and Connectivity Configuration in Wireless Sensor Networks” in *SenSys’03, Los Angeles, California, USA, November 2003*, pp. 28-39.
- [53] D. Pompili, T. Melodia, I. F. Akyildiz, “Deployment Analysis in Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks”, in *WUWNet’06, Los Angeles, California, USA, September 25, 2006*, pp. 48-55.
- [54] S. Haldar, A. Ghosal, and S. D. Bit, “A predetermined node deployment strategy to prolong network lifetime in wireless sensor network”, in *Computer Communications*, vol. 34, Issue 11, 2011, pp. 1294-1306.
- [55] I. Khou, P. Minet, A. Laouiti, and S. Mahfoudh, “Survey of Deployment Algorithms in Wireless Sensor Networks: Coverage and Connectivity Issues and Challenges”, in *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, 2014, pp. 1- 24.
- [56] C. Zhu, C. Zheng, L. Shu, and G. Han, “A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks”, in *Journal of Networks and Computer Applications*, 2012, pp. 619-632.
- [57] W. Ramdane-Cherif, “Gestion de la production Problèmes d’optimisation en tournées sur arcs”, *thèse de doctorat de L’UTT, Décembre 2002*, pp. 58-70.
- [58] X. Chen, Y. S. Ong, M. H. Lim, and K. C. Tan, “multi-facet survey on memetic computation”, in *IEEE Trans. Evol. Comput*, 2011, pp. 591-607.
- [59] M. Le berre, “Optimisation de déploiement et localisation de cible dans les réseaux de capteurs”, *thèse de doctorat de l’Université de technologie de Troyes, juin 2014*, pp. 1-30.
- [60] A. Rossi, A. Singh and M. Sevaux, “Column generation algorithm for sensor coverage scheduling under bandwidth constraints”, in *Networks*, 2012, 60 (3), pp. 141-154.

- [61] D. V. Ambekar, A. D. Bhoi, and R. D. Kharadkar, "A Survey on Sensors Lifetime Enhancement Techniques in Wireless Sensor Networks", in *International Journal of Computer Applications*, December 2014, Volume 107, No. 19, pp. 22-25.
- [62] A. Rossi, A. Singh, and M. Sevaux, "Lifetime maximization in wireless directional sensor network", in *European Journal of Operational Research* 231, 2013, pp. 229-241.
- [63] C. Chen, C. Chuang, T. Lin, C. Leeb, and J. Jiang, "A Coverage-guaranteed Algorithm to Improve Network Lifetime of Wireless Sensor Networks", in *Engineering* 5, 2010, pp. 192-195.
- [64] C-K. Ting and C-C. Liao, "A memetic algorithm for extending wireless sensor network lifetime", in *Journal Information Sciences* 180, 2010, pp. 4818-4833.
- [65] G. Fan and S. Jin, "Coverage Problem in Wireless Sensor Networks: A Survey", in *Journal of networks*, vol. 5, No. 9, 2010.
- [66] A. Chamam and S. Pierre, "Dynamic Sensor Activation for Maximizing Network Lifetime under Coverage Constraint", in *Symposium on Communication and information technologies, ISCIT*, pp. 971-976.
- [67] R. Cerulli, R. Donato, and A. Raiconi, "Exact and heuristic methods to maximize network life time in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges", in *European Journal of Operational Research* 220, 2012, pp. 58-66.
- [68] T. S. Panag and J. S. Dhillon, "Heuristic Search Algorithm (HAS) for Enhancing the Lifetime of Wireless Sensor Networks", in *International Journal Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engeneering*, vol. 9, No. 8, 2015, pp. 774-777.
- [69] N. A. Aras, E. Guney E, and C. Ersoy, "Binary integer programming formulations and heuristics for differentiated coverage in heterogeneous sensor networks", in *Computer Networks*, 2008, 52, pp. 2419-2431.
- [70] M. Cardei, M. Thai, Y. Li, and W. Wu, "Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks", in *Proceedings of the 24th annual joint conference of the IEEE computer and communication societies (INFOCOM)*, vol. 3, 2005, pp. 1976-1984.
- [71] F. Martins, "A dynamic multiobjective hybrid approach for designing Wireless Sensor Networks", in *Evolutionary Computation, CEC'09. IEEE Congresson*, 2009.
- [72] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks", in *Proceedings of the IEEE INFOCOM, New York, USA, June 2002*, pp. 1567-1576.



- [73] J. Kaur, T. C. Aseri, and A. Kakria, “A survey of locally synchronized MAC protocols in Wireless sensor network”, in *International Journal of Computer Applications*, Vol. 91, No. 11, April 2014, pp. 37- 41.
- [74] T. van Dam and K. Langendoen, “An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks”, in *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, California, USA, November 2003*, pp. 171-180.
- [75] A. Kakria and T. C. Aseri, “A Survey on Asynchronous MAC protocols in Wireless Sensor Networks”, in *International Journal of Computer Applications (0975-8887)*, Vol. 108, No. 9, December 2014, pp. 19-22.
- [76] J. Polastre, J. Hill, and D. E. Culler, “Versatile low power media access for wireless sensor networks” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys, Baltimore, MD, USA, November 2004*, pp. 95-107.
- [77] A. Ullah, G. Kim, and J. S. Ahn, “Performance Analysis of X-MAC protocol with Collision Avoidance Algorithm”, in *IEEE INFOCOM, 2013*, pp. 211-212.
- [78] I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, and J. Min, “Z -MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks”, in *IEEE/ACM Transaction Networking, 2008, Vol. 16, No. 3*, pp. 511 -524.
- [79] A. Boulis, “Castalia: A simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks, Version 3.2 User’s Manual”, *NICTA, March 2011*, pp. 2-120.
- [80] Y. Challal, “Réseaux de capteurs sans fils”, *version 1, SIT60, 2008*.
- [81] Medecine sans fil, [Online] : <http://www.astrosurf.com/luxorion/medecine-sans-fil.html>
- [82] Sylvain Perifel, “Livre Complexité Algorithmique”, *Version électronique sous licence Creative Commons, 2014*, pp. 1-60.
- [83] Stéphane Grandcolas, “Cours Complexité des algorithmes”, pp. 1-36.
- [84] Anthony Labarre, “Cours Structures de données et algorithmes fondamentaux-Complexité algorithmique”, *UPEM (Université Paris-Est Marne-la-vallée), Octobre 2015*, pp. 1-169.
- [85] François Laroussinie, “Notes de cours d’algorithmique-L3, UFR d’Informatique, Université Paris 7- Paris Diderot”, *Année 2010-2011*, pp. 1-5.
- [86] OMNeT++ discrete event simulator, [Online]: <https://omnetpp.org/>
- [87] OMNeT++ Discrete Event Simulation System.
- [Online]: <http://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1999/18/ned.htm>
- [88] A. Nayyar<sup>1</sup> and R. Singh, “A Comprehensive Review of Simulation Tools for Wireless Sensor Networks (WSNs)”, in *Journal of Wireless Networking and Communications, 2015*, pp. 19-47.

- [89] C. T. Kone, “Design of the architecture for a large Wireless Sensor Network, Thesis Network and Telecommunications”, *Henri Poincare University (Nancy I)*, 2011, pp. 27-31.
- [90] Chipcon, CC2420 Data Sheet. [Online]:<http://www.chipcon.com>