



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*
Cotutelle internationale avec *l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar*

Présentée et soutenue le 17/07/2014 par :
Ibrahima DIANE

**Optimisation de la consommation d'énergie par la prise en
compte de la redondance de mesure dans les réseaux de
capteurs**

JURY

HERVÉ GUYENNET	Professeur, Université de Franche-Comté	Rapporteur
CHEIKH SARR	Professeur, Université de Thiès	Rapporteur
YAHIA SLIMANI	Professeur, Université de Tunis	Examineur
RAHIM KACIMI	MCF, Université Toulouse III	Examineur
ZOUBIR MAMMERI	Professeur, Université Toulouse III	Co-Directeur
IBRAHIMA NIANG	Professeur, Université de Dakar	Co-Directeur

école doctorale et spécialité :

MITT : Domaine STIC : Réseaux, Télécoms, Systèmes et Architecture

Unité de Recherche :

*Institut de Recherche en Informatique et Télécommunication de Toulouse
(IRIT - UMR 5505)*

Co-Directeur(s) de Thèse :

Zoubir MAMMERI et Ibrahima NIANG

Rapporteurs :

Hervé GUYENNET et Cheikh SARR

Remerciements

“Traitez les gens comme s’ils étaient ce qu’ils doivent être et vous les aiderez à devenir ce qu’ils sont capables d’être...”

Avant tout, un grand merci à Dieu qui m’a donnée la force et la vie pour accomplir cette tâche.

Je tiens à remercier Mr. Zoubir MAMMERI et Mr Ibrahima NIAN, mes directeurs de thèse pour leur encouragement, leur disponibilité, leurs idées, leurs conseils et leur sympathie qui m’ont permis de mener à bien cette thèse. Je les remercie de m’avoir accordé le temps nécessaire pour s’entretenir avec moi et m’orienter vers le bon chemin dans la recherche et surtout pour l’atmosphère de sérénité qu’ils ont su me m’octroyer.

J’exprime ensuite ma plus profonde gratitude à Mr. Hervé GUYENNET et Mr. Cheikh SARR qui ont accepté de rapporter cette thèse. Je tiens à remercier également Mr Yahia SLIMANI d’avoir examiné la thèse. J’ai beaucoup apprécié leur participation au jury de cette thèse malgré le long voyage.

Je tiens à remercier infiniment Mr. Rahim KACIMI, mon co-encadreur, pour sa disponibilité, ses idées, sa sympathie et surtout son soutien indéfectible dans les moments difficiles.

Ce travail a été réalisé au sein de l’Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT-UPS) et du Laboratoire d’Informatique de Dakar (LID-UCAD). Je tiens donc à remercier les responsables de ces laboratoires de m’avoir accueilli et donné l’opportunité de réaliser ce travail de thèse.

Un grand merci à tous les membres de l’Institut de Recherche en Informatique de Toulouse qui m’ont procuré une ambiance chaleureuse pour effectuer mon travail ainsi que des séjours extrêmement agréables.

Merci à tous mes collègues de l’équipe T2RS : Cédric TEYSSIE, Rahim KACIMI, Muhammad Imran KHAN, Abakar Zakaria ASSEF, Mohammad Charaf EDDIN

et Adel BERRADJ pour leur sympathie durant le temps où on a travaillé ensemble et pour les discussions de recherche dans le domaine des réseaux de capteurs.

Merci à tous mes amis Sénégalais, Français et de toute nationalité qui m'ont énormément soutenu aux moments les plus difficiles et qui étaient toujours près de moi. Je n'oublierai jamais les moments qu'on a passés ensemble.

Un merci sans égal à ma famille au Sénégal pour son soutien, son encouragement et d'être le pilier de ma réussite. Je remercie particulièrement ma mère et mon épouse que j'aime et j'adore.

Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil sont utilisés aujourd'hui dans de nombreuses applications qui incluent notamment : la domotique, la santé, le domaine militaire ou encore la surveillance de phénomènes environnementaux. Toutefois, le dénominateur commun de toutes les applications de réseaux de capteurs reste la limite des capteurs en raison de leurs ressources matérielles limitées dont la plus contraignante est l'énergie. Cette thèse a pour objectif d'étudier les techniques permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des réseaux de capteurs sans fil denses. Deux nouvelles techniques sont proposées.

La première approche développée dans cette thèse concerne la conservation d'énergie fondée sur redondance de mesure. Le protocole proposé MR-LEACH (*Measurement Redundancy aware LEACH*) s'adresse à la problématique posée par l'absence de gestion efficace d'énergie au sein des grands réseaux de capteurs hiérarchiques. MR-LEACH est une extension du protocole LEACH bien connue pour améliorer la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. En plus de la formation du cluster selon le protocole LEACH, les nœuds sont regroupés en tenant compte de leur redondance et un seul nœud transmet à la fois les données dans chaque groupe redondant. Cette méthode a les avantages de présenter une faible consommation d'énergie, d'accroître la durée de vie du réseau et de réduire le délai de bout en bout.

Le protocole OER (*Optimization of Energy based on Redundancy*) est la seconde contribution de cette thèse. L'objectif est double. Nous proposons tout d'abord une méthode de partitionnement de réseaux de capteurs fondée sur les modèles de détection. Les modèles de détection estiment la manière dont un nœud est capable de détecter les phénomènes. Il s'agit ensuite de proposer un algorithme de recherche d'un partitionnement optimal. Nous nous sommes focalisés sur la variation d'une fonction objectif. OER détermine si un partitionnement obtenu est meilleur pour minimiser la fonction objectif. Par la suite, l'impact de la recherche de solution optimale sur la durée de vie du réseau a été étudiée.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) are used today in many applications that differ in their own objectives and specific constraints. The application areas for wireless sensor networks are various : home automations, health care services, military domain, and environment monitoring. However the common challenge in designing WSN applications comes from the specific constraints of sensors because of their limited physical resources such as weak computational capability, small memory capacity and especially limited battery lifetime. This thesis aims to develop techniques to improve the energy efficiency of dense wireless sensor networks. Two new techniques are proposed.

The first approach developed in this thesis concerns the energy conservation based on measurement redundancy. The proposed MR-LEACH (*Measurement Redundancy aware LEACH*) protocol address the main issue resulting from the absence of a energy efficient management within the large hierarchical wireless Sensor networks. MR-LEACH is an extension to the well-known LEACH protocol to improve energy consumption in cluster-based WSNs. In addition to cluster formation according to LEACH protocol, the nodes are grouped taking into account their redundancy and only a single node transmits data in each redundant group. This method have the advantages of presenting a low energy consumption, increasing the network lifetime and decreasing the end-to-end delay.

OER (*Optimization of Energy based on Redundancy*) protocol is the second contribution of this thesis. There are two main objectives. Firstly, we propose a partitioning method for sensor networks based on sensing models. Sensing models estimate the manner in which a node is able to detect the phenomena. Secondly, we propose a search algorithm for finding an optimal partitioning. We focused on the variation of a objective function. OER determines whether a partitioning obtained is best to minimize the objective function. Thereafter, the impact of optimal solution search on network lifetime has been investigated.

Table des Matières

Introduction Générale	1
1 Réseaux de capteurs sans fil : Composants de base et applications	7
1.1 Introduction	7
1.2 Architecture d'un capteur	8
1.2.1 Sonde ou unité de détection	8
1.2.2 Unité de traitement	9
1.2.3 Unité de transmission	9
1.2.4 Unité de contrôle d'énergie	10
1.3 Offres des fabricants de capteurs	10
1.3.1 Offre Tmote-Sky de Moteiv	11
1.3.2 Offre Sun-SPOT de Sun Microsystems	12
1.3.3 Offre WiEye de EasySen	13
1.3.4 Offre de CrossBow	14
1.3.5 Offre JENNIC	15
1.3.6 Autres solutions commerciales	16
1.4 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	17
1.4.1 Types de réseaux de capteurs	20
1.4.1.1 RCSF terrestres	21
1.4.1.2 RCSF souterrains	21

1.4.1.3	RCSF sous-marins	22
1.4.1.4	RCSF multimédia	22
1.4.1.5	RCSF mobiles	23
1.5	Domaines d'application des réseaux de capteurs	24
1.5.1	Applications militaires	24
1.5.2	Applications liées à la sécurité	24
1.5.3	Applications médicales	25
1.5.4	Applications environnementales	25
1.5.5	Applications commerciales	26
1.6	Conclusion	26
2	Réseaux de capteurs sans fil : Caractéristiques et Protocoles	29
2.1	Introduction	29
2.2	Exigences des applications de réseaux de capteurs	29
2.2.1	Efficacité énergétique	30
2.2.2	Passage à l'échelle	30
2.2.3	Capacité du canal	31
2.2.4	Latence	31
2.2.5	Débit	31
2.2.6	Équité dans le partage du canal	32
2.2.7	Déterminisme	32
2.2.8	Auto-configuration	32
2.2.9	Tolérance aux pannes	33
2.2.10	Coût de déploiement	33
2.3	Causes de surconsommation d'énergie	33
2.3.1	Collisions et Retransmissions	33
2.3.2	“Overmitting” ou envoi infructueux	34

2.3.3	Écoute à vide ou “idle listening”	34
2.3.4	Écoute abusive ou “overhearing”	34
2.3.5	Overhead des paquets de contrôle	35
2.4	Critères de performance	35
2.5	Architecture protocolaire et fonctionnalités	37
2.5.1	Couche physique	37
2.5.2	Sous-couche MAC	38
2.5.3	Couche réseau et routage	40
2.6	Techniques d’agrégation et formation de clusters	41
2.6.1	Agrégation de données	41
2.6.2	Organisation en clusters	43
2.7	Conclusion	44
3	Techniques d’optimisation de la consommation d’énergie dans les WSNs : État de l’art	45
3.1	Introduction	45
3.2	Durée de vie d’un réseau de capteurs	46
3.3	Techniques du Duty-cycling	48
3.3.1	Protocoles Sleep/Wakeup	48
3.3.2	Protocoles du niveau MAC	49
3.3.2.1	Protocoles MAC basés sur TDMA	50
3.3.2.2	Protocoles MAC avec contention	51
3.3.2.3	Protocoles MAC hybrides	53
3.4	Techniques centrées sur les données	54
3.4.1	Réduction des données	54
3.4.2	Acquisition de données efficace en énergie	55
3.5	Techniques hiérarchiques	57

3.5.1	Structure en clusters	57
3.5.1.1	LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierar- chy)	58
3.5.1.2	TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)	60
3.5.1.3	APTEEN (Adaptive Threshold-sensitive Energy Ef- ficient sensor Network protocol)	60
3.5.1.4	VGA (Virtual Grid Architecture routing)	61
3.5.1.5	CTLMN (Clustering Technique for Large multihop Mobile wireless Networks)	62
3.5.1.6	HEED (Hybrid, Eenergy-Efficient, Distributed ap- proach)	62
3.5.1.7	CSOS (Cluster-based Self-Organization algorithm for wireless Sensor networks)	63
3.5.1.8	SAR (Sensor Aggregates Routing)	63
3.5.2	Structure en chaîne	64
3.5.2.1	PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor In- formation Systems)	65
3.5.2.2	Placide	66
3.5.3	Structure en zone	66
3.5.3.1	TTDD (Two-Tier Data Dissemination)	66
3.6	Techniques basées sur la mobilité de collecteur	67
3.7	Conclusion	68
4	Solution pour la conservation d'énergie fondée sur la redondance de mesure	71
4.1	Introduction	71
4.2	Redondance dans les réseaux de capteurs	71

4.3	Problématiques liées à la redondance de mesure	72
4.4	Technique de regroupement par proximité géographique	73
4.4.1	Hypothèses	74
4.4.2	Principe de l'approche	74
4.4.3	Algorithme de regroupement de nœuds	76
4.4.4	Exemple de scénario	76
4.4.5	Contexte d'exécution de notre contribution	79
4.5	Évaluation de performance	80
4.5.1	Environnement de simulation	80
4.5.2	Paramètres de simulation	81
4.5.2.1	scénario 1	81
4.5.2.2	scénario 2	85
4.6	Discussions	88
4.6.1	Consommation moyenne d'énergie des CHs	88
4.6.2	Consommation moyenne d'énergie des nœuds	88
4.6.3	Durée de vie moyenne du réseau	89
4.6.4	Délai de bout en bout	89
4.6.5	Exemples d'applications	89
4.6.6	Faiblesses de la solution proposée	90
4.7	Conclusion	90
5	Optimisation de la consommation d'énergie basée sur les modèles de détection	91
5.1	Introduction	91
5.2	Modèles de détection	92
5.2.1	Modèle de détection déterministe	92
5.2.2	Modèle de détection probabiliste	93

5.3	Problématique	95
5.4	Solution heuristique de partitionnement d'un réseau de capteurs . .	96
5.4.1	Hypothèses	96
5.4.2	Formulation	96
5.4.3	Principe	97
5.4.4	Fonction objectif	98
5.4.5	Algorithmes	99
5.4.5.1	Algorithme de partitionnement	99
5.4.5.2	Algorithme d'optimisation	106
5.5	Évaluation de la solution proposée	111
5.5.1	Environnement de simulation	111
5.5.2	Description et scénarios de la simulation	111
5.5.2.1	scénario 1 : cas de déploiement aléatoire	112
5.5.2.2	scénario 2 : cas d'une densité homogène	114
5.5.2.3	scénario 3 : cas d'une densité non-homogène	116
5.6	Conclusion	117
Conclusion et Perspectives		121

Liste des Figures

1.1	Structure d'un nœud capteur	8
1.2	Capteur Tmote-Sky de Moteiv	12
1.3	Solution Sun-SPOT	13
1.4	L'offre WiEye de EasySen	14
1.5	Offre TelosB de CrossBow	15
1.6	Pile protocolaire JENNIC	15
1.7	Réseaux de capteurs sans fil	17
1.8	Architecture d'un réseau plat	19
1.9	Architecture d'un clustering mono-saut	20
1.10	Architecture d'un clustering multi-sauts	20
1.11	Architecture d'un clustering multi-niveau	21
2.1	Pile protocolaire IEEE 802.15.4	38
2.2	Clause SQL d'agrégation de données	42
3.1	Formation de clusters dans LEACH [171]	58
4.1	Représentation du round de la solution	75
4.2	Topologie initiale	78
4.3	Réseau de capteurs après regroupement par proximité géographique et analyse des mesures relevées	79
4.4	Consommation moyenne d'énergie de chaque CH durant un round	83

4.5	Consommation moyenne d'énergie de chaque nœud après 20 rounds	83
4.6	Durée de vie moyenne du réseau	84
4.7	Délai de bout en bout	84
4.8	Consommation moyenne d'énergie de chaque CH durant un round .	86
4.9	Consommation moyenne d'énergie de chaque nœud après 20 rounds	86
4.10	Durée de vie moyenne du réseau	87
4.11	Délai de bout en bout	87
5.1	Modèle à disque	92
5.2	Modèle exponentiel [182, 183]	93
5.3	Modèle polynomial [14]	94
5.4	Modèle à escalier [96]	94
5.5	Modèle probabiliste d'Elfes	95
5.6	Exemple de partitionnement	98
5.7	Région d'événements	100
5.8	Détection des nœuds redondants	101
5.9	Déploiement initial	102
5.10	Formation du premier groupe redondant	102
5.11	Première étape du partitionnement	103
5.12	Exemple de partitionnement	103
5.13	Organigramme de la recherche tabou	107
5.14	Consommation moyenne d'énergie de chaque nœud durant un round	113
5.15	Durée de vie moyenne du réseau	114
5.16	Consommation moyenne d'énergie de chaque nœud durant un round	115
5.17	Durée de vie moyenne du réseau	115
5.18	Consommation moyenne d'énergie de chaque nœud durant un round	116
5.19	Durée de vie moyenne du réseau	117

Liste des Tables

1.1	Caractéristiques des capteurs Tmote-Sky de Moteiv	12
1.2	Caractéristiques des capteurs Sun-SPOT	13
1.3	Caractéristiques des capteurs Crossbow	14
1.4	Caractéristiques des capteurs JENNIC	16
1.5	Différences entre réseaux de capteurs et réseaux ad hoc	18
2.1	IEEE 802.15.4 - Paramètres de modulation	38
3.1	Bilan des solutions hiérarchiques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs	67
4.1	Valeurs de données durant la phase d'observation	78
4.2	Groupes redondants du cluster 1	79
4.3	Paramètres de simulation	82
4.4	Paramètres de simulation	85
5.1	Voisinage des nœuds	109
5.2	Paramètres de simulation	112

Introduction Générale

Depuis leurs origines, les réseaux de télécommunications sans fil ont connu un succès sans cesse croissant au sein des communautés industrielles et scientifiques. En raison de ses nombreux avantages pratiques, la technologie sans fil est devenue un outil incontournable dans les architectures réseaux actuelles. En effet, le média hertzien offre des propriétés uniques qui se résument essentiellement en trois points : la facilité du déploiement, l'ubiquité de l'information et le coût réduit d'installation.

Ainsi plusieurs architectures dérivées sont nées de l'évolution du paradigme sans fil, parmi lesquelles on peut citer : les réseaux cellulaires (GSM), les réseaux locaux sans fil et les réseaux ad hoc (MANET i.e. Mobile Ad hoc NETworks). Les progrès technologiques dans les domaines de la microélectronique, des communications sans fil, couplés aux efforts de miniaturisation et la réduction des coûts de production des composants électroniques, ont permis le développement de nouvelles générations de réseaux sans fils. Ces derniers offrent beaucoup d'avantages notamment en termes de déploiement. Cependant, de nouveaux problèmes sont apparus et rendent les réseaux sans fils moins fiables que les réseaux filaires. Aussi de nouvelles techniques doivent être mises en œuvre pour pallier ces problèmes.

Des réseaux pour téléphones mobiles aux réseaux locaux sans fil en passant par les réseaux ad-hoc, la recherche aujourd'hui s'est beaucoup focalisée sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Ceux-ci sont des réseaux ad hoc généralement composés d'un grand nombre de nœuds communicants et distribués sur une zone donnée afin d'acheminer les informations vers des points de traitement. Ces informations proviennent de la collecte d'événements survenus sur la zone de couverture

où sont déployés les capteurs. Elles sont souvent des paramètres liés à l'environnement comme la température, la pression atmosphérique, l'humidité, l'intensité lumineuse, les mouvements sismiques, le bruit, etc...

Successeurs naturels des réseaux ad hoc tant dans l'historique que dans l'héritage des techniques, les réseaux de capteurs sans fil partagent avec les MANET (Mobile Ad hoc NETworks) plusieurs propriétés communes comme l'absence d'infrastructure, les communications sans fil, et les caractéristiques d'auto-configurabilité et de spontanéité. Toutefois, ils diffèrent dans leurs domaines d'application.

Contrairement aux réseaux MANET, dont le succès est jusqu'ici un peu modeste, les réseaux de capteurs sans fil ont quant à eux réussi à attirer un grand nombre d'utilisateurs compte tenu de leur réalisme, de leur apport concret ainsi que de la flexibilité offerte par leur mode d'utilisation. En effet, le besoin d'un suivi continu d'un environnement donné est assez courant dans diverses activités de la société. Les processus industriels, les applications militaires, le monitoring d'habitat, ainsi que l'agriculture de précision ne sont que quelques exemples d'une panoplie vaste et variée d'applications possibles du suivi continu offert par les réseaux de capteurs. Grâce à ce potentiel riche en applications, les RCSF ont su se démarquer des réseaux MANET en attirant de grandes firmes internationales, comme IBM, Sun, Intel et Philips [61].

Les RCSF ont suscité beaucoup d'engouement dans la recherche scientifique en raison notamment des nouveaux problèmes de routage sous forte contrainte de durée de vie du réseau et de faibles capacités des nœuds. Malgré la miniaturisation et la réduction du coût de fabrication, ces capteurs sont généralement dotés de ressources limitées en termes de puissance de transmission, de capacité de traitement et de stockage des données et d'énergie.

Ces contraintes matérielles ont influencé une grande partie des problématiques de recherche du domaine. La contrainte de la durée de vie du réseau est ainsi une préoccupation majeure étant donné le caractère souvent inaccessible des zones de surveillance (il est souvent impossible de recharger ou de remplacer les batteries des

nœuds après leur épuisement). Il se pose donc une problématique de préservation énergétique, particulièrement si l'application doit fonctionner longtemps. En outre, la limitation de la bande passante peut engendrer de grandes latences et par la suite un faible niveau de qualité de service (QoS). En effet, plus la charge ou la densité du réseau est grande, moins vite un nœud accèdera au médium pour transmettre ses données. Due à la limitation de mémoire, les paquets peuvent être supprimés avant que le nœud puisse les envoyer à destination. Il se pose donc une problématique de passage à l'échelle mais aussi de connectivité au cours du temps [7, 170, 180] par exemple pour des applications de RCSF comme celles de la surveillance environnementale où un grand nombre de capteurs (de l'ordre de centaines de milliers de nœuds) peuvent être déployés aléatoirement sur des étendues géographiques assez vastes, de plusieurs dizaines de kilomètres carrés.

Les caractéristiques particulières des WSNs modifient les critères de performances par rapport aux réseaux sans fil traditionnels. Dans les réseaux locaux filaires ou les réseaux cellulaires, les critères les plus pertinents sont le débit, la latence et la qualité de service car les nouvelles activités telles que le transfert d'images, le transfert de vidéos, et la navigation sur Internet requièrent un débit important, une faible latence, et une bonne qualité de service. En revanche, dans les réseaux de capteurs conçus pour surveiller une zone d'intérêt, la longévité du réseau est fondamentale. De ce fait, la conservation de l'énergie est devenue un critère de performance prépondérant et se pose en premier lieu tandis que les autres critères comme le débit ou l'utilisation de la bande passante sont devenus secondaires.

La conception de tels réseaux doit s'appuyer sur une architecture modulaire et son fonctionnement sur une stratégie assurant les performances du réseau et prolongeant sa durée de vie. Une solution envisageable est d'introduire une hiérarchie dans le réseau pour assurer performances, passage à l'échelle et durabilité. Pour ce faire, une grande partie des travaux de recherches propose de construire une structure virtuelle dans laquelle une topologie logique est construite sur la topologie physique du réseau. Le fonctionnement d'une telle structure est généralement basé

sur des principes d'auto-organisation, processus par lequel un ensemble d'éléments, interagissant les uns avec les autres, produisent une organisation qui tend à se maintenir sur une certaine durée. L'auto-organisation tend à augmenter la durée de vie et à minimiser le trafic de contrôle du réseau afin d'offrir de meilleurs services réseaux comme le routage et la diffusion de l'information, la compression et/ou l'agrégation des données, la synchronisation, la localisation, etc.

Le déploiement aléatoire des réseaux de capteurs peut induire une grande redondance entre les nœuds. Cette redondance représente pour les réseaux de capteurs une caractéristique qui est à la fois rentable et pénalisante. Elle peut être utilisée pour améliorer la fiabilité de la détection ou l'exactitude des données collectées. Par contre, elle engendre un transfert de données plus important et implique une charge de trafic supplémentaire. Ce constat nous motive à renforcer ses aspects positifs.

Au cours de cette thèse nous nous sommes intéressés à la redondance dans les réseaux de capteurs, surtout ceux de taille importante. Le souci principal est de prolonger la vie du système en économisant l'énergie dépensée par chaque nœud capteur du réseau. Pour cela, nous avons proposé deux techniques permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des réseaux de capteurs sans fil denses.

Dans l'objectif d'amélioration des performances du réseau en termes de consommation d'énergie, nous proposons une démarche adaptée aux grands réseaux où la présence de la redondance s'avère évidente. Notre démarche utilise la proximité géographique pour prendre en compte la redondance de mesure entre les nœuds.

Ce manuscrit est organisé en cinq chapitres. Dans le chapitre 1, nous présentons les réseaux de capteurs sans fil et leurs applications, en commençant par les divers éléments constitutifs d'un capteur suivi d'une présentation de quelques technologies de capteurs avant de définir brièvement l'architecture générale d'un réseau de capteurs. En fin, nous passons en revue les principaux domaines d'applications.

Dans le chapitre 2, nous exposons les exigences des applications en regard des objectifs visant à limiter les effets des causes fréquentes de surconsommation

d'énergie. Nous rappelons ensuite, les critères de performance les plus rencontrés dans la littérature avant de présenter les solutions relatives à chaque couche réseau, et de finir par un bref aperçu des techniques d'agrégation et de formation de clusters.

Nous poursuivons l'état de l'art dans le chapitre 3 où la durée de vie des réseaux de capteurs est définie. Nous rappelons ensuite, les techniques d'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

Le chapitre 4 est une contribution relative à la prise en compte de la redondance de mesure où nous présentons une technique de conservation d'énergie dans des réseaux de capteurs denses. Nous nous adressons à la problématique posée par l'absence de gestion efficace d'énergie au sein des grands réseaux de capteurs hiérarchiques.

Le chapitre 5 est une seconde contribution relative à l'optimisation de la consommation d'énergie. Nous proposons une méthode de partitionnement de réseaux de capteurs fondée sur les modèles de détection.

Enfin, nous concluons cette thèse en présentant les perspectives de recherche ouvertes par ce travail.

Chapitre 1

Réseaux de capteurs sans fil : Composants de base et applications

1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs constituent une catégorie de réseaux sans fil comportant un grand nombre de nœuds. Ils sont caractérisés par un déploiement très dense et à grande échelle dans des environnements souvent limités en terme de ressources. Ces nœuds déployés autour ou dans une zone à observer sont utilisés pour l'acquisition de données et leur transmission à une station de traitement appelée communément "Station de Base". Les caractéristiques les plus importantes de ces nœuds sont leurs capacités d'auto-organisation, de coopération, leur rapidité de déploiement, leur tolérance aux erreurs et leur faible coût.

Cependant, les réseaux de capteurs sont étroitement contraints en termes d'énergie, de mémoire, de capacité de traitement et de débit. Ils sont aussi contraints par une bande passante réduite et une latence élevée due à la nature du canal radio partagé. Les capteurs peuvent être mobiles. Ce qui nécessite des algorithmes adaptatifs au changement de la topologie réseau. Néanmoins, le vrai défi critique dans ce type de réseaux est l'énergie car les capteurs sont dotés souvent de batteries non rechargeables. Ainsi, le défi principal dans ces réseaux est de minimiser la consommation d'énergie tout en assurant que le réseau effectue sa tâche dans des meilleures conditions.

La tâche première d'un nœud capteur est de détecter un événement (par exemple, un changement de température, des mouvements, des vibrations, ...). Cette détection peut être périodique. Le nœud est donc capable de récolter des données relatives

à son environnement, de les traiter, puis, si nécessaire, de les communiquer à des nœuds voisins via un support de communication sans fil. Bien que ces réseaux de capteurs partagent de nombreux points communs avec les réseaux ad hoc existants, ils présentent également un certain nombre de différences et des enjeux très spécifiques.

1.2 Architecture d'un capteur

Un nœud capteur est principalement composé de quatre unités de base : la sonde ou l'unité de détection, l'unité de traitement, l'unité de transmission et l'unité de contrôle d'énergie. Il peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation (GPS ou un autre système de localisation qui donne au capteur sa position), un système générateur d'énergie (cellule solaire ou photovoltaïque), ou bien un système de mesure de distance ou d'angle avec un nœud capteur voisin. On rencontre aussi des capteurs plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le capteur en cas de nécessité.

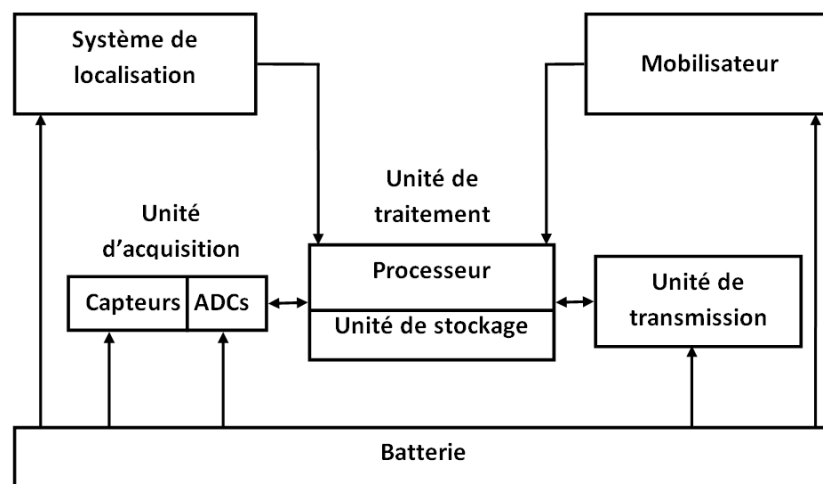


FIGURE 1.1 – Structure d'un nœud capteur

1.2.1 Sonde ou unité de détection

La sonde, c'est-à-dire le capteur proprement dit, est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable par exemple, une tension électrique, une intensité lumineuse ou encore une température. Elle se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne s'agit que d'une simple

interface entre un processus physique et une information manipulable. L'unité de détection est généralement composée de deux sous-unités : le récepteur (reconnaisant l'analyte) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement.

La sonde est caractérisée par plusieurs critères dont les plus courants sont la grandeur physique observée (lumière, température, bruit, humidité, etc...), son étendue de mesure ou rayon de détection, sa sensibilité, sa gamme de température d'utilisation. Pour utiliser une sonde capteur dans les meilleures conditions, il est souvent utile de pratiquer un étalonnage et de connaître les incertitudes de mesures relatives à celle-ci.

1.2.2 Unité de traitement

Elle comprend un processeur généralement associé à une petite unité de stockage. Elle fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les microcapteurs (TinyOS [59], par exemple). Elle exécute les protocoles de communications qui permettent de faire "collaborer" un nœud avec les autres nœuds du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du nœud puits (station de base).

1.2.3 Unité de transmission

Elle effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un medium sans-fil. Elle peut être de type optique (comme dans les nœuds Smart Dust [63]), ou de type radio-fréquence (MICA2 [64], par exemple).

- Les communications de type optique sont robustes vis-à-vis des interférences électriques. Néanmoins, ne pouvant pas établir de liaisons à travers des obstacles, elles présentent l'inconvénient d'exiger une ligne de vue permanente entre les entités communicantes.
- Les unités de transmission de type radio-fréquence comprennent des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage ; ceci implique une augmentation de la complexité.

Concevoir des unités de transmission de type radio-fréquence avec une faible consommation d'énergie est un défi car pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant

et donc une énergie consommée importante. L'alternative consistant à utiliser de longues antennes n'est pas possible à cause de la taille réduite des capteurs.

1.2.4 Unité de contrôle d'énergie

Un capteur est muni d'une ressource énergétique limitée (généralement une batterie). Étant donné sa petite taille, cette ressource énergétique est généralement non-remplaçable. Ce qui fait souvent de l'énergie la ressource la plus précieuse d'un réseau de capteurs, car elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et donc celle du réseau entier. L'unité de contrôle d'énergie constitue donc un système essentiel. Elle doit répartir l'énergie disponible aux autres modules, de manière optimale (par exemple en réduisant les dépenses inutiles et en mettant en veille les composants inactifs). Cette unité peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement via des cellules photovoltaïques par exemple.

1.3 Offres des fabricants de capteurs

Parmi les standards les plus aptes à être exploités dans les réseaux de capteurs sans-fil se retrouvent la double pile protocolaire Bluetooth / ZigBee. Bluetooth est une spécification de l'industrie des télécommunications. Elle utilise une technologie radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques. Initiée en 1994 par Ericsson, la technique Bluetooth a été fondée sur le standard IEEE 802.15.1 et a comme but la création et le maintien de réseaux à portée personnelle, PAN (Personal Area Network). De tels réseaux sont utilisés pour le transfert de données à bas débit et à faible distance entre appareils compatibles. Malheureusement, le grand défaut de cette technologie est sa trop grande consommation d'énergie et ne peut donc pas être adaptée aux capteurs qui sont alimentés par une batterie et qui idéalement devraient fonctionner durant plusieurs années.

La norme ZigBee combinée avec le standard IEEE 802.15.4 offre des caractéristiques qui répondent encore mieux aux besoins des réseaux de capteurs en termes d'économie d'énergie. ZigBee offre des débits de données moindres, mais elle consomme également nettement moins que Bluetooth. Un faible débit de données n'est pas un handicap pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes. Malgré tout, la tendance actuelle des constructeurs est d'employer des techniques propriétaires qui ont pour avantage d'être spécifiquement optimisées

pour une utilisation précise, mais qui ont comme gros inconvénient de ne pas être compatibles entre elles.

D'un point de vue matériel, de nouvelles techniques vont influencer l'avenir des réseaux de capteurs. UWB (Ultra Wide Band) [184] en est un très bon exemple. Cette technique de transmission permettra d'atteindre des niveaux de consommation extrêmement bas grâce à sa simplicité au niveau matériel. De plus, l'atténuation du signal engendré par des obstacles est moindre qu'avec les systèmes radio à bande étroite conventionnels.

D'un point de vue logiciel, le domaine des capteurs sans fil se dirige donc vers un grand essor et de très nombreux nouveaux produits risquent d'inonder les marchés ces prochaines années. D'autant plus que des techniques "open-source" s'associent à ce succès avéré, comme par exemple TinyOS qui a été développé à l'Université de Berkeley. TinyOS est un système d'exploitation "open-source" conçu pour les capteurs sans fil et qui est actuellement utilisé par plus de 500 universités et centres de recherche dans le monde.

Dans ce qui suit, nous passons en revue les principales offres de constructeurs de capteurs.

1.3.1 Offre Tmote-Sky de Moteiv

Spécifiquement conçus pour le déploiement rapide de prototypes d'applications, les capteurs Tmote-Sky de Moteiv [32] sont adaptés aux applications industrielles de contrôle de température, d'humidité et de lumière. Munies d'une antenne intégrée de portée 50m en intérieur et de 125m en plein air, ils sont en outre accompagnés d'une interface USB facilitant ainsi leur interopérabilité de façon transparente avec d'autres équipements et périphériques. Conçus avec le support natif de TinyOS [59], les capteurs Tmote Sky de Moteiv mettent à profit les technologies émergentes liées aux protocoles sans fil tout en bénéficiant également des possibilités logicielles issues de l'open-source.

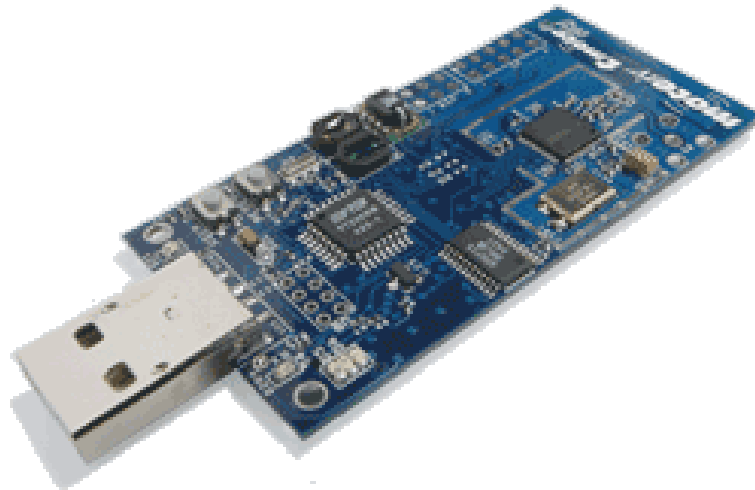


FIGURE 1.2 – Capteur Tmote-Sky de Moteiv

TABLE 1.1 – Caractéristiques des capteurs Tmote-Sky de Moteiv

Hardware	Sonde Capteur	Batterie
8MHz Texas Instruments MSP430	Température	2 piles AA
10k RAM, 48k Flash	Humidité	21-23 mA en mode réception
250kbps 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Radio	Lumière	19-21 mA en mode émission
Antenne intégrée		5-21 uA deep sleep mode
USB interface		Logiciel de gestion

1.3.2 Offre Sun-SPOT de Sun Microsystems

Sun-SPOT [83] (Sun Small Programmable Object Technology) est un capteur sans fil développé par Sun Microsystems, basé sur Mote. Le dispositif repose sur le standard IEEE 802.15.4. Contrairement aux autres systèmes Mote disponibles, Sun-SPOT est construit sur la machine virtuelle Java Squawk.



FIGURE 1.3 – Solution Sun-SPOT

TABLE 1.2 – Caractéristiques des capteurs Sun-SPOT

Hardware	Sonde Capteur	Batterie
180 MHz 32 bit ARM920T core 512K RAM - 4M Flash 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Radio Antenne intégrée AT91 timer chip USB interface	Accéléromètre Température Lumière	3.7V rechargeable 750 mAh lithium-ion 30 uA deep sleep mode Logiciel de gestion

La première série limitée des kits de développement Sun-SPOT a été lancée en avril 2007. Ce premier kit introductif comprend deux capteurs Sun-SPOT, une Station de Base Sun-SPOT, les outils de développement logiciel et un câble USB. Le logiciel est compatible avec Windows XP, Mac OS X 10.4, et la plupart des distributions Linux courantes.

L'ensemble du projet (le matériel, l'environnement d'exploitation, la machine virtuelle Java, les pilotes et applications) est disponible en open source.

1.3.3 Offre WiEye de EasySen

Développé par EasySen, WiEye [84] est un ensemble de cartes modulaires destinées aux applications de réseau de capteurs sans fil (RCSF) répondant aux besoins des professionnels de la surveillance et de la sécurité. Le dispositif repose sur le standard IEEE 802.15.4 et est particulièrement adapté à la détection de présence et de mouvement d'individus et/ou de véhicules. Composées de plusieurs sondes ou unités de détection, et privées d'unité de traitement (Fig. 1.4(a)), les cartes

WiEye sont conçues en tant que modules complémentaires pour être connectées sur d'autres équipements dotés de processeurs à l'instar des capteurs Tmote-Sky de Moteiv (Fig. 1.4(b)).

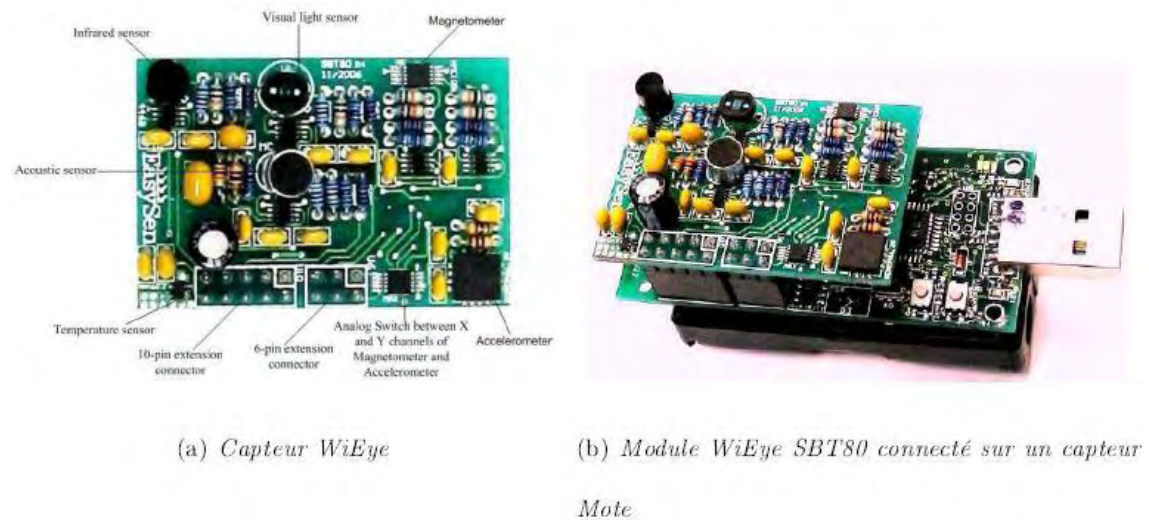


FIGURE 1.4 – L'offre WiEye de EasySen

1.3.4 Offre de CrossBow

Crossbow [18] propose un système hardware comprenant l'unité de traitement (microcontrôleur et unité de stockage), l'unité de contrôle d'énergie et l'unité de transmission qui assure l'envoi des données vers la Station de Base.

TABLE 1.3 – Caractéristiques des capteurs Crossbow

Hardware	Sonde Capteur	Batterie
MICAz ZigBee Series (MPR2400) 4Ko RAM - 512Mo Flash 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Radio Microcontrôleur 8Mhz 250kbps, High Data Rate Radio Antenne intégrée Rayon d'émission 150m (plein air)	Connecteur d'extension pour : Lumière Température Pression Activité Sismique Acoustique Magnétique	2 piles AA 25 mA (transmission) 15 uA (mode sommeil)

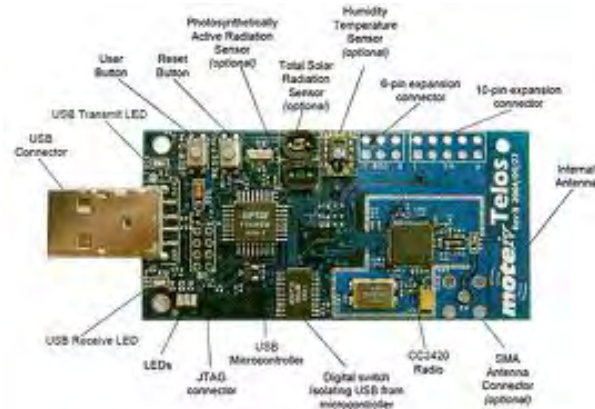


FIGURE 1.5 – Offre TelosB de CrossBow

1.3.5 Offre JENNIC

Munies d'un processeur 32-bits à architecture RISC, les solutions JENNIC [58] sont destinées aussi bien à la domotique qu'aux applications industrielles. Caractérisées par leur très faible consommation d'énergie assurant ainsi une longue durée de vie de la batterie, elles ciblent particulièrement les domaines de la localisation, de la télémétrie, du contrôle à distance, des jouets et des périphériques de jeux. Leurs caractéristiques sont résumées dans la table 1.4.

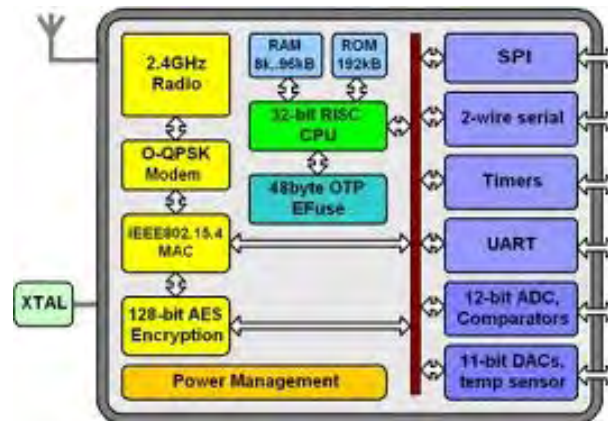


FIGURE 1.6 – Pile protocolaire JENNIC

TABLE 1.4 – Caractéristiques des capteurs JENNIC

Hardware	Sonde Capteur	Batterie
Low power 32-bit RISC CPU 4 to 32MHz clock speed 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Radio 128Ko RAM - 128Ko Flash 500 - 667kbps data rate Antenne intégrée Puissance d'émission 2.5dbm Connecteur SMA d'antenne externe	Température Humidité Lumière	2 - 3.7V 1.25 uA deep sleep mode 15.0mA (réception) 17.5mA (transmission)

1.3.6 Autres solutions commerciales

Il existe plusieurs autres offres commerciales disponibles sur le marché des capteurs :

- La société Spotme propose l'offre TinyNode composée de capteurs et de cartes modulaires destinés aux applications industrielles [17]. Cette offre est accompagnée d'une gamme de produits destinés à la recherche académique et compatibles avec TinyOS [59].
- Les produits T-Node, G-Node et L-Node [60] de SOWNet Technologies constituent des réponses aux besoins spécifiques de la recherche académique et des développeurs d'applications de réseaux de capteurs. Cette société propose plusieurs kits de développement compatibles TinyOS, permettant une intégration facile avec des produits opensource. Elle propose, en outre, une application de surveillance des musées et des œuvres d'art, qui utilise des capteurs gérés à distance pour offrir une surveillance discrète (invisible) et individuelle de chaque œuvre d'art.
- Les solutions Silicon Labs [85] et Microchip [86] sont des offres compatibles ZigBee destinées à la fois aux applications industrielles et à la recherche académique.

Comme nous le constatons, devant l'engouement des chercheurs vis-à-vis des réseaux de capteurs, l'offre des constructeurs s'est énormément multipliée ces dernières années afin d'apporter des réponses concrètes aux besoins à la fois industriels et académiques.

1.4 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteurs sans fil (Fig. 1.7) est constitué d'un ensemble de nœuds capteurs déployés dans un environnement donné, en vue d'une application précise (relevé de température, de pression, contrôle, surveillance, détection d'intrusions, humidité de l'air, agriculture, domotique, domaine médical, etc.). Les capteurs communiquent entre eux pour relayer l'information vers un nœud "Sink" (puits) qui communique avec l'interface utilisateur.

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF ou WSN pour Wireless Sensor Network) est donc composé d'un grand nombre de capteurs autonomes capables de recueillir et de collaborer ensemble pour transmettre des données environnementales. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une région géographique, appelée zone de couverture ou "champ de détection".

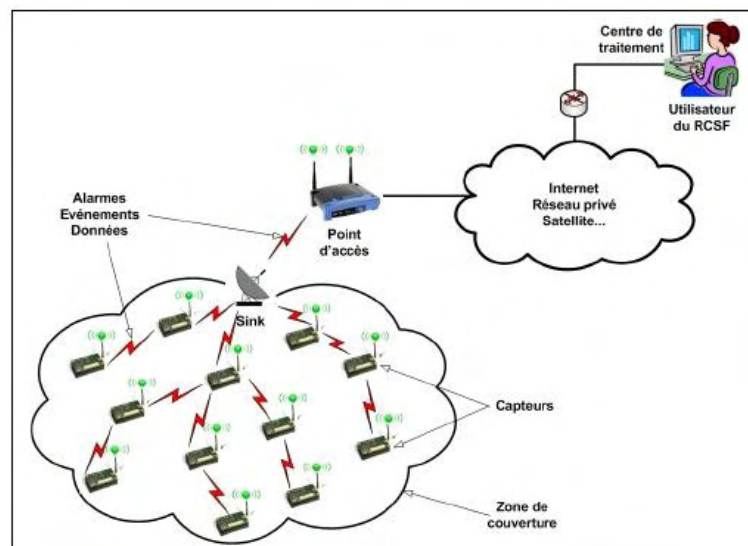


FIGURE 1.7 – Réseaux de capteurs sans fil

Les données recueillies par les capteurs sont acheminées grâce à un routage mono- ou multi-sauts vers un nœud considéré comme un "point de collecte", appelé "Sink". Depuis le centre de traitement, l'utilisateur du RCSF se connecte au Sink grâce aux infrastructures de l'Internet ou à l'aide d'un système de communication par satellite ou encore grâce à d'autres systèmes de télécommunications. L'utilisateur peut ainsi, par le biais du Sink, adresser des requêtes aux autres capteurs du réseau en précisant le type de données requises et recueillir, puis analyser les événements recensés par les capteurs sur la zone de couverture.

Les réseaux de capteurs sans fil s'apparentent donc aux réseaux ad hoc. En effet, ces deux types de réseaux ont plusieurs points communs :

- Autonomie, auto-configurabilité et spontanéité,
- Utilisation des ondes radio pour communiquer.

Cependant, les besoins et les contraintes de ces réseaux diffèrent tel qu'il est montré par la table 1.5.

TABLE 1.5 – Différences entre réseaux de capteurs et réseaux ad hoc

	Capteurs	Ad hoc
Composants	Capteurs	Portables, PDAs, ...
Objectif	Ciblé	Générique / Communication
Contrainte clé	Energie	Débit
Communication	Broadcast	Point à point
Flot de communication	"many to one"	"any to any"
noeud central	Sink, Station de Base	Aucun
Relation entre les noeuds	Collaboration	Chaque noeud a son objectif
Taille	Très grande	Peu de noeuds
Mobilité	Très faible	forte mobilité

L'architecture d'un réseau de capteurs multi-sauts peut être organisée en deux types : plate et hiérarchique [29].

- Dans un réseau plat, chaque nœud joue le même rôle dans l'exécution d'une tâche de détection et tous les nœuds sont des pairs. En raison du grand nombre de nœuds, il n'est pas possible d'attribuer un identifiant global à chaque nœud dans un réseau de capteurs. Pour cette raison, la collecte de données s'effectue généralement en utilisant un routage data-centric, où le collecteur de données transmet une requête à tous les nœuds dans la région de détection via une inondation (flooding) et seuls les nœuds capteurs qui ont les données correspondant à la requête répondent au sink. Chaque capteur communique avec le sink via un chemin multi-sauts et utilise ses nœuds pairs en tant que relais. La figure 1.8 montre l'architecture typique d'un réseau plat.

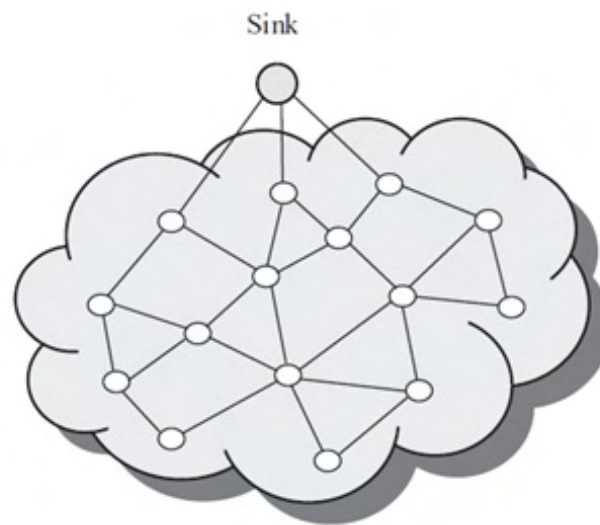


FIGURE 1.8 – Architecture d'un réseau plat

– Dans un réseau hiérarchique, les capteurs sont organisés en clusters, où les membres du cluster envoient leurs données aux Cluster-Heads (CH) tandis que les cluster-heads servent de relais pour transmettre les données au sink. Un nœud à faible énergie peut être utilisé pour effectuer la tâche de détection et envoyer les données captées à son cluster-head à une courte distance, tandis qu'un nœud avec plus d'énergie peut être choisi comme cluster-head pour traiter les données des membres de son cluster et de transmettre les données traitées au sink. Ce processus peut non seulement réduire la consommation d'énergie pour la communication, mais aussi équilibrer la charge de trafic et améliorer la scalabilité lorsque la taille du réseau augmente. Comme tous les nœuds capteurs ont la même capacité de transmission, le *clustering* doit être effectué périodiquement afin d'équilibrer la consommation d'énergie entre tous les nœuds capteurs. En outre, l'agrégation des données peut être réalisée par les cluster-heads pour réduire la quantité de données transmise au sink et d'améliorer l'efficacité énergétique du réseau. Le problème majeur avec le *clustering* est de savoir comment sélectionner les cluster-heads et comment organiser les clusters. Dans ce contexte, il existe de nombreuses stratégies de *clustering*. Selon la distance entre les membres des clusters et leurs chefs (cluster-heads), un réseau de capteurs peut être organisé en une architecture hiérarchisée mono-saut ou multi-sauts, comme le montre les figures 1.9 et 1.10. Selon le nombre de niveaux dans la hiérarchie du cluster, un réseau de capteurs peut être organisé en une architecture hiérarchique simple-niveau ou multi-niveau.

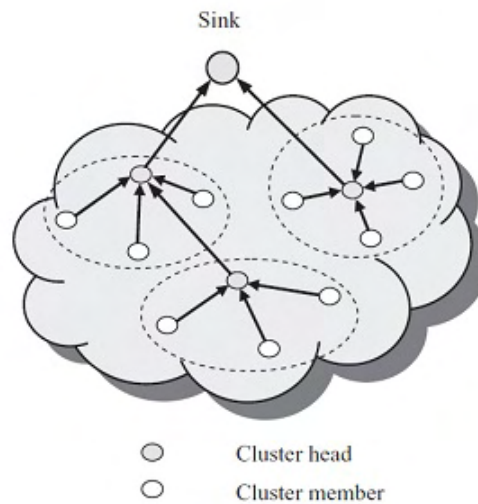


FIGURE 1.9 – Architecture d'un clustering mono-saut

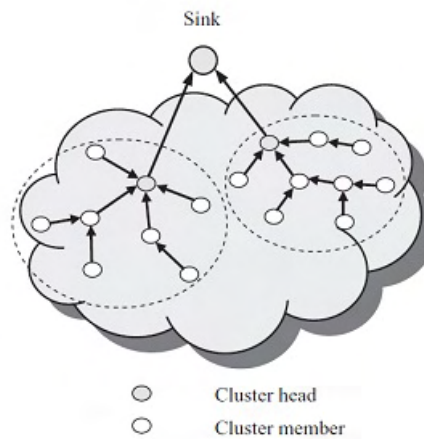


FIGURE 1.10 – Architecture d'un clustering multi-sauts

La figure 1.11 illustre un exemple d'architecture de clustering multi-niveau.

1.4.1 Types de réseaux de capteurs

Les RCSF courants sont déployés sur terre, sous terre et dans l'eau. Suivant l'environnement, un réseau de capteur fait face à différents challenges et contraintes. Il y a cinq types de base de réseaux de capteurs : les RCSF terrestres (terrestrial WSN), les RCSF souterrains (underground WSN), les RCSF sous-marins (underwater WSN), les RCSF multimédias (multi-media WSN) et les RCSF mobiles (Mobile WSN) [30]. Il existe aussi des types hybrides comme les RCSF terrestres mobiles ou multimedia.

1.4.1.1 RCSF terrestres

Ils consistent typiquement en un nombre élevé de nœuds capteurs sans fil déployés dans un espace donné de façon aléatoire ou suivant une stratégie (pré-planifié) [46]. Avec le déploiement aléatoire, les nœuds capteurs peuvent être largués depuis un avion et aléatoirement placés dans la région ciblée. Dans le déploiement pré-planifié, il peut y avoir une grille de placement, un placement optimal, etc. [40].

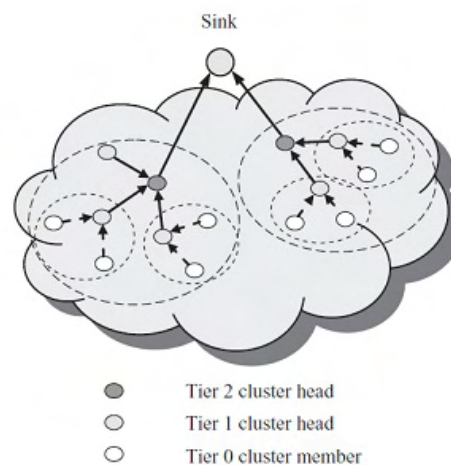


FIGURE 1.11 – Architecture d'un clustering multi-niveau

Dans un RCSF terrestre, les nœuds capteurs doivent être capables de transmettre efficacement les données à la station de base. Puisque la batterie a une charge limitée et peut être non rechargeable, les capteurs terrestres peuvent cependant être équipés d'une source d'énergie secondaire telles que les cellules solaires. Dans tous les cas, il est important pour les capteurs de conserver l'énergie. Pour un RCSF terrestre, l'énergie peut être conservée avec un routage multi-saut optimal, une courte portée de transmission, une agrégation des données, l'élimination de données redondantes, la minimisation des délais, et l'utilisation des opérations cycliques (duty-cycle operations).

1.4.1.2 RCSF souterrains

Ils consistent en un nombre de capteurs enfouis sous le sol ou dans une cave ou mine utilisée pour surveiller des conditions souterraines [41, 42]. Des nœuds sink additionnels sont localisés au-dessus sur le sol pour relayer l'information des

nœuds à la station de base. Un RCSF souterrain est plus cher qu'un RCSF terrestre en termes d'équipement, de déploiement et de maintenance. Les capteurs souterrains doivent être capables d'assurer une communication sûre à travers le sol, les rochers et d'autres contenants minéraux. L'environnement souterrain fait de la communication sans fil un challenge à cause des pertes et de l'atténuation des signaux. Contrairement aux RCSF terrestres, le déploiement d'un RCSF souterrain requiert une planification soigneuse et des considérations d'énergie et de coûts. L'énergie est un souci important dans les RCSF souterrains. Comme pour un RCSF terrestre, les nœuds capteurs souterrains sont équipés d'une batterie à charge limitée et une fois déployés sous le sol, il est difficile de recharger ou de remplacer une batterie d'un capteur. Comme auparavant, un objectif clé est de conserver l'énergie afin d'augmenter la durée de vie du réseau, laquelle peut être obtenue par un protocole de communication efficace.

1.4.1.3 RCSF sous-marins

Ils consistent en un nombre de nœuds et de véhicules sous-marins déployés dans l'eau [43, 44]. Des véhicules sous-marins autonomes sont utilisés pour l'exploration ou la collecte de données des capteurs. Comparé à un déploiement dense des capteurs dans un RCSF terrestre, un nombre réduit de nœuds est déployé dans les RCSF sous-marins. Les communications sans fil sous-marines typiques sont établies à travers une transmission d'ondes acoustiques. Des challenges en communication acoustique sous-marine résident dans une bande passante limitée, un long délai de transmission et un affaiblissement de signal. Un autre challenge est la défaillance des capteurs due aux conditions environnementales. Les nœuds capteurs sous-marins doivent être capables de s'auto-configurer et de s'adapter à l'environnement océanique rude. Les capteurs sous-marins sont équipés d'une batterie à charge limitée qui ne peut être remplacée ou rechargée.

1.4.1.4 RCSF multimédia

Ils ont été proposés pour permettre la surveillance et la traque d'événements de type multimédia tels que la vidéo, l'audio et l'image. Les RCSF multimédia [45] consistent en un nombre de nœuds équipés de caméras et de microphones. Ces capteurs communiquent en sans fil pour l'extraction, le traitement, la corrélation et la compression de données. Les capteurs multimédia sont déployés de façon pré-planifiée dans l'environnement pour garantir la couverture. Les challenges dans les

RCSF multimédia incluent une demande de bande passante élevée, une consommation énergétique élevée, une garantie d'une qualité de service (QoS), des techniques de compression et de traitement de données, une conception inter-couche (a cross-layer design). L'approvisionnement de QoS est une tâche stimulante due aux délais variables et la capacité variable du canal. C'est important qu'un certain niveau de QoS soit atteint pour une livraison de contenu fiable. Dans les RCSF multimédia, le traitement, le filtrage et la compression des données peuvent, de manière significative, améliorer la performance réseau en termes de gestion de l'information redondante et des contenus fusionnés.

1.4.1.5 RCSF mobiles

Il s'agit d'une collection de capteurs qui peuvent se déplacer d'eux-mêmes et interagir avec l'environnement physique [30]. Les nœuds ont l'aptitude de capter, calculer et communiquer comme des nœuds statiques. Une différence clé est que les nœuds mobiles ont l'aptitude de se repositionner et de s'organiser en réseau. Un RCSF mobile peut débiter avec un certain déploiement initial et les nœuds peuvent ensuite se disperser pour recueillir l'information. L'information recueillie par un nœud mobile peut être communiquée à un autre nœud mobile quand ils sont à portée l'un de l'autre. Une autre différence clé est la distribution des données. Contrairement dans un RCSF statique, le routage dynamique est utilisé dans un RCSF mobile. Les challenges dans les RCSF mobiles incluent le déploiement, la localisation, l'auto-organisation, la navigation et le contrôle, la couverture, l'énergie, la maintenance et le traitement de données.

Les applications des RCSF mobiles incluent la surveillance d'environnement, la traque de cible, la recherche et le sauvetage, et la surveillance en temps réel à l'aide de robots. Pour la surveillance environnementale dans les catastrophes naturelles, un déploiement manuel peut ne pas être possible. Les capteurs mobiles peuvent se déplacer vers des endroits d'événements après le déploiement pour fournir la couverture requise. Dans la surveillance et la traque militaires, les capteurs mobiles peuvent collaborer et prendre des décisions sur la cible. Ils peuvent également atteindre un haut degré de couverture et de connectivité comparés aux nœuds statiques. En présence d'obstacles dans le champ de couverture, les capteurs mobiles peuvent planer au-dessus et bouger de manière appropriée pour être à portée de la cible.

1.5 Domaines d'application des réseaux de capteurs

L'évolution des supports de communication sans fil, la miniaturisation, le faible coût des capteurs et l'élargissement de la gamme des sondes de détection (thermique, humidité, optique, vibrations, etc.) ont élargi le champ d'applications des réseaux de capteurs. Ils permettent de collecter et de traiter des informations complexes issues de l'environnement (météorologie, acidification des océans, dispersion des polluants, etc.). Ils s'insèrent également dans d'autres systèmes industriels tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage.

Les réseaux de capteurs pourraient aussi révolutionner la manière même de comprendre et de construire des systèmes physiques complexes, notamment dans les domaines militaire, environnemental, domestique, santé, sécurité, etc.

1.5.1 Applications militaires

Le domaine militaire a été, comme dans le cas de plusieurs technologies, un précurseur pour le développement d'applications de réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (amis ou ennemis), ou d'analyser le terrain avant d'envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations, par exemple) [47].

1.5.2 Applications liées à la sécurité

Les réseaux de capteurs permettent le suivi en temps réel des structures d'avions, de navires, d'automobiles, ou des métros, de même que des réseaux de fourniture et de distribution d'énergie électrique et de gaz.

Un réseau de capteurs détectant les mouvements ou le bruit peut constituer un système de détection et de prévention d'intrusions sur un site industriel ou un secteur critique. Déjouer le système ne serait plus aussi simple, puisqu'il n'existe pas de point critique. La prévention d'accidents par la surveillance des routes ou des voies ferrées est une des applications envisagées des réseaux de capteurs sans fil.

L'évolution des mouvements sismiques, les altérations de structures d'un bâtiment, d'une route, d'un quai, d'une voie ferrée, d'un pont ou d'un barrage hydroélectrique (suite à un séisme ou au vieillissement) pourraient être détectées par des capteurs. Certains capteurs ne s'activant que périodiquement peuvent fonctionner durant des années, voire des décennies.

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité pourrait diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant de meilleurs résultats [47, 181].

1.5.3 Applications médicales

La surveillance des fonctions vitales d'un organisme vivant peut être facilitée par des micro-capteurs avalés ou implantés sous la peau. Des gélules sous forme de micro-capteurs ou de micro-caméras pouvant être avalées existent déjà et permettent, sans recours à la chirurgie, de transmettre des images depuis l'intérieur d'un corps humain.

La surveillance de la glycémie, la surveillance des organes vitaux ou la détection précoce de certains cancers sont des applications biomédicales envisagées. Des réseaux de capteurs permettraient également une surveillance en temps réel des maternités (détection de vol de bébés) ou des patients.

1.5.4 Applications environnementales

La surveillance des migrations d'oiseaux, d'animaux de petite taille ou d'insectes est une des applications environnementales possibles des réseaux de capteurs sans fil. Il devient ainsi possible d'observer la bio-diversité, sans déranger, des espèces animales vulnérables ou difficiles à étudier dans leur environnement naturel, et de proposer des solutions plus efficaces pour la conservation de la faune et de la flore.

Grâce aux réseaux de capteurs, il est également possible de détecter des problèmes environnementaux comme la pollution, les incendies en milieu forestier, ainsi que la possibilité d'évaluer le taux de pesticides dans l'eau.

Sur les sites industriels, les centrales nucléaires ou dans les sites pétroliers, des capteurs peuvent être déployés en réseau pour détecter en temps réel des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.) afin d'alerter les utilisateurs et les secours plus rapidement, et permettre ainsi une intervention efficace.

L'intégration de plusieurs micro-capteurs dans le système de climatisation et de chauffage des immeubles est maintenant possible. Ainsi, la climatisation ou le chauffage ne sont déclenchés qu'aux endroits où il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire. Le système distribué peut aussi maintenir une température homogène dans les pièces. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait probablement de réduire la demande mondiale en énergie [47].

1.5.5 Applications commerciales

Dans le domaine de la grande distribution, les réseaux de capteurs pourraient améliorer le processus de stockage et de livraison (pour surveiller la chaîne du froid en particulier) [48]. Le réseau ainsi formé, pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet, d'une palette ou d'une cargaison.

Des entreprises manufacturières, à l'aide des réseaux de capteurs, pourraient suivre le procédé de production depuis la matière première jusqu'au produit final livré.

Dans les immeubles, le système domotique de chauffage et de climatisation, d'éclairage ou de distribution d'eau pourrait optimiser son efficacité grâce aux capteurs. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait de réduire la demande mondiale en énergie et indirectement les émissions de gaz à effet de serre. Rien qu'aux États-Unis, cette économie est estimée à 55 milliards de dollars par an, avec une diminution de 35 millions de tonnes des émissions de carbone dans l'air [31].

1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté l'architecture interne des micro-capteurs, l'offre des fabricants ainsi que les réseaux de capteurs et leurs domaines d'applications.

Devant la multiplication des applications de capteurs, les fabricants ont répondu par une offre diverse et variée couvrant les besoins des industriels et les exigences spécifiques des chercheurs.

Les réseaux de capteurs sans fil possèdent des caractéristiques particulières qui les différencient des autres types de réseaux sans fil. Ces spécificités telles que la consommation d'énergie réduite, la scalabilité ou le routage incitent le besoin de

concevoir de nouveaux protocoles d'accès au support, de routage, de sécurité, de transport ou d'application, qui s'adapteront aux caractéristiques des RCSF.

Les réseaux de capteurs sans fil ne cessent de prendre une place très appréciée au sein de la communauté de la recherche vu leur déploiement assez simple et leurs applications qui se développent chaque jour pour élargir leur horizon. Initialement, réservés aux applications militaires, aujourd'hui, les RCSF ont réussi à conquérir d'autres domaines civils plus larges et plus pratiques changeant le quotidien des êtres humains.

Dans le chapitre suivant, nous allons poursuivre l'état de l'art en nous intéressant plus particulièrement aux techniques courantes des différentes couches réseaux.

Chapitre 2

Réseaux de capteurs sans fil : Caractéristiques et Protocoles

2.1 Introduction

La mise en œuvre de capacités de traitement, de stockage, de détection et de communication dans des dispositifs de petite taille, à faible coût et leur intégration dans ce qu'on appelle des réseaux de capteurs sans fil, ouvre la voie à une multitude de nouvelles applications. La conception d'une application de réseau de capteurs nécessite la prise en compte des facteurs de consommation d'énergie afin de mieux appréhender ses exigences et de lui garantir de meilleures performances. Dans ce chapitre, nous détaillerons d'abord les exigences des applications de réseaux de capteurs. Ensuite, nous présenterons les causes fréquentes de surconsommation d'énergie dont les effets doivent être réduits par chaque solution protocolaire, avant de présenter les différents critères de performance utilisés dans l'évaluation de solutions applicatifs ou protocolaires. Enfin, nous présenterons les différentes couches d'une architecture de réseau de capteurs et donnons un bref aperçu des techniques d'agrégation et de formation de clusters.

2.2 Exigences des applications de réseaux de capteurs

Du fait même des caractéristiques des réseaux de capteurs et des contraintes inhérentes, les protocoles classiques des réseaux sans fil s'avèrent inadaptés [33]. Passons en revue les trois éléments clés qui conditionnent la conception ou le choix d'un protocole [31], [34], et [37] :

1. Les capteurs doivent avoir une faible consommation d'énergie : le changement de batteries serait fastidieux compte tenu du nombre élevé de capteurs dans le réseau et le branchement sur une prise électrique serait contraignant.
2. En raison de la densité des capteurs requise par les applications, les solutions doivent permettre la connexion de milliers de capteurs en réseau.
3. De plus, avec un nombre élevé de capteurs, le réseau doit pouvoir s'organiser tout seul. Il devra être également tolérant aux pannes (résistant aux défaillances des nœuds).

2.2.1 Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est l'une des exigences fortes auxquelles on est confronté dans la conception des protocoles de réseaux de capteurs. Compte tenu de leur nature et des conditions de déploiement dans les zones de couverture (densité, manque d'accessibilité, etc.), il est très difficile, voire impossible, de changer ou de recharger les batteries des capteurs. Ainsi, prolonger la durée de vie de chaque nœud devient un objectif en soi, afin de garantir une plus grande durée de vie globale pour le réseau entier.

Pour assurer l'efficacité énergétique, les solutions envisagées doivent éviter ou réduire les effets et les causes de la surconsommation d'énergie.

2.2.2 Passage à l'échelle

La scalabilité (ou passage à l'échelle) est la capacité du réseau et de ses composants à être utilisés sur des plateformes de taille importante (plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de nœuds) [88]. La scalabilité et l'adaptabilité sont des contraintes étroitement liées à la nature des applications de réseaux de capteurs. Les protocoles conçus doivent s'adapter aux changements auxquels sont soumis les réseaux de capteurs. Ainsi, la perte de nœuds par épuisement de batterie avec le temps, les nouveaux capteurs qui rejoignent le réseau ou ceux qui le quittent, entraînant des changements de taille, de densité et de topologie, sont des contraintes que l'application doit gérer. D'autant plus que les réseaux de capteurs sont souvent déployés d'une façon ad-hoc dans des environnements.

2.2.3 Capacité du canal

L'utilisation du canal reflète à quel point la bande passante entière du canal est utilisée dans les communications [89]. Elle est également désignée comme l'utilisation de la bande passante ou la capacité du canal. C'est une question importante dans les systèmes de téléphonie cellulaire ou dans les réseaux locaux sans fil, puisque la bande passante est la ressource la plus précieuse dans de tels systèmes. En revanche, le nombre de nœuds actifs dans les réseaux de capteurs est principalement déterminé par l'application dont le but est souvent de détecter des événements significatifs dans l'évolution de l'environnement contrôlé. L'utilisation du canal est normalement un but secondaire dans les réseaux de capteurs, mais ceux-ci peuvent devenir si vite inopérants dès lors que la charge de trafic devient trop importante.

2.2.4 Latence

La latence se rapporte au délai entre le moment où un émetteur a un paquet à envoyer et le moment où que le paquet est reçu avec succès par son destinataire [90]. Dans les réseaux de capteurs, l'importance de la latence dépend de l'application. Dans les applications telles que la surveillance ou le contrôle, les nœuds sont vigilants pendant un long moment, mais en grande partie inactifs jusqu'à ce qu'un événement soit détecté. Ces applications peuvent souvent tolérer une latence additionnelle de transmission de messages. Dans une communication multi-sauts, atténuer la latence en réduisant le nombre de sauts peut permettre une économie considérable d'énergie.

2.2.5 Débit

Souvent mesuré en bits ou octets par seconde, le débit se rapporte à la quantité de données transférées avec succès depuis un émetteur vers un récepteur en un temps donné [91, 92]. Beaucoup de facteurs influent sur le débit, notamment la latence, l'utilisation du canal ainsi que l'efficacité des mécanismes permettant d'éviter les collisions et l'overhead. En fonction de ses objectifs, l'application est souvent conçue pour exiger un certain débit. Toutefois, dans la détection d'événements, les applications sont caractérisées par un faible débit exigé. Ce qui permet ainsi d'économiser l'énergie car un débit élevé est synonyme d'une grande consommation d'énergie.

2.2.6 Équité dans le partage du canal

L'équité reflète la capacité des différents utilisateurs, des nœuds, ou des applications à partager le canal de manière équitable [33]. C'est une exigence forte dans les réseaux traditionnels de voix ou de données, puisque chaque utilisateur désire une opportunité égale pour envoyer ou recevoir des données pour ses besoins propres. Cependant, dans les réseaux de capteurs, tous les nœuds collaborent pour un objectif commun en jouant parfois des rôles différents. De ce fait, à un moment donné, un nœud pourrait avoir beaucoup plus de données à envoyer que d'autres. Ainsi, l'équité dans le partage du canal n'est pas une contrainte forte pour les applications de capteurs dont la performance globale est plus dépendante de la répartition de la charge entre les nœuds que du partage du canal.

2.2.7 Déterminisme

L'aspect déterminisme est une autre caractéristique essentielle liée aux contraintes applicatives. Assurer un fonctionnement déterministe dans un réseau de capteurs sans fil consiste à pouvoir acheminer un paquet de données d'une source vers une destination finale, dans un délai borné avec une certaine probabilité de réussite (99% par exemple). Pour ce faire, la couche MAC doit garantir un délai déterminé pour accéder au médium sans risque de collision.

Les protocoles MAC basés sur CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ne garantissent ni un délai borné d'accès au médium, ni une transmission sans collision et par conséquent n'offrent pas un délai borné de bout en bout dès que la charge du réseau augmente. En revanche, les protocoles MAC basés sur TDMA (Time Division Multiple Access) , avec un bon dimensionnement des intervalles de temps alloués selon le trafic généré et son orientation, peuvent assurer d'une manière déterministe un délai borné de bout en bout dans une topologie multi-sauts [38].

2.2.8 Auto-configuration

La nature des applications des réseaux de capteurs sans fil peut nécessiter une topologie de réseau dynamique. Cela induit que le réseau doit supporter des topologies larges, denses et dynamiques. L'aspect dynamique provient de la défaillance occasionnelle de certains nœuds, de l'ajout de noeuds, de la perte de noeuds, de la mobilité ou des changements des conditions de propagation.

2.2.9 Tolérance aux pannes

Les capteurs peuvent être sujets à des dysfonctionnements dus à des défauts de fabrication ou plus fréquemment à un épuisement de batterie. Les interactions externes (chocs, interférences, pertes de nœuds) peuvent aussi être à l'origine de dysfonctionnements [93]. Afin que les pannes n'empêchent pas le réseau d'accomplir sa mission principale, les protocoles ainsi que les applications doivent être conçus dans le but de garantir la continuité et la qualité du service.

2.2.10 Coût de déploiement

Afin de pouvoir justifier son intérêt, le coût global d'un réseau de capteurs sans fil doit être faible par rapport à celui d'un réseau classique et "raisonnable" par rapport aux objectifs de l'application. En effet, un RCSF doit être conçu afin que la maintenance et le support soient des plus aisés et à moindre coût.

En résumé, les exigences ci-dessus sont à prendre en compte dès l'élaboration de tout protocole ou application de réseaux de capteurs en fonction de sa mission principale. En général, pour les réseaux de capteurs sans fil, les contraintes les plus fortes sont l'efficacité énergétique, le passage à l'échelle et l'adaptabilité aux changements dynamiques, l'auto-configuration, la tolérance aux pannes et le coût de déploiement.

2.3 Causes de surconsommation d'énergie

L'efficacité énergétique est l'une des questions les plus importantes dans les réseaux de capteurs sans fil. Quelque soit la couche réseau considérée (MAC, réseau ou application), pour concevoir un protocole efficace d'un point de vue énergétique, il faut toujours prendre en compte les facteurs de surconsommation d'énergie. Les facteurs suivants sont les principales causes de perte d'énergie dans un RCSF.

2.3.1 Collisions et Retransmissions

Les collisions sont la plus importante des causes de perte d'énergie. Les collisions se produisent dans deux cas :

- Quand deux paquets sont transmis en même temps et s'interfèrent, ils deviennent inexploitable et doivent être abandonnés.

- Lorsqu'un nœud reçoit simultanément deux paquets qui n'ont pas nécessairement été émis en même temps ou qui ont été émis par deux nœuds hors de portée l'un de l'autre.

Ainsi, les retransmissions suite aux collisions occasionnent une consommation d'énergie. En général, les protocoles MAC tentent à leur manière d'éviter les collisions. Les collisions sont un problème important dans les protocoles à contention, mais elles ne le sont pas généralement dans les protocoles planifiés [33].

2.3.2 “Overmitting” ou envoi infructueux

L'overmitting se produit lorsqu'un nœud source émet des données et que le nœud destinataire n'est pas prêt à les recevoir. Si le nœud émetteur est en attente d'un acquittement, il retransmet alors le même paquet plusieurs fois provoquant ainsi une consommation d'énergie du fait qu'il soit resté en mode transmission et en attente de réception de l'éventuel acquittement.

2.3.3 Écoute à vide ou “idle listening”

L'écoute à vide ou “idle listening” se produit quand la radio écoute le canal pour recevoir d'éventuelles données. Son coût énergétique est particulièrement élevé. Beaucoup de protocoles MAC (tels que des protocoles CSMA et CDMA) écoutent toujours le canal à l'état actif, supposant que le dispositif complet serait éteint par l'utilisateur s'il n'y a aucune donnée à envoyer. Le coût exact de l'écoute à vide dépend du matériel radio et du mode de fonctionnement. Pour les radios longue distance (0.5km ou plus), la puissance de transmission domine les coûts de réception et d'écoute [33]. En revanche, plusieurs générations de radio à courte portée affichent des coûts d'écoute particulièrement élevés, du même ordre que les coûts de réception et de transmission [49].

2.3.4 Écoute abusive ou “overhearing”

Une autre cause fréquente de surconsommation d'énergie est l'écoute abusive, ou “overhearing”, qui se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. L'écoute abusive pourrait engendrer une grande perte d'énergie lorsque la charge de trafic est élevée. Cette perte devient plus importante quand le réseau a une grande densité de nœuds.

2.3.5 Overhead des paquets de contrôle

Pour fonctionner, un protocole réseau a toujours besoin de paquets de contrôle et d'entêtes pour encapsuler les données applicatives. L'envoi, la réception et l'écoute des paquets de contrôle consomment de l'énergie et de la bande passante réduisant ainsi le débit effectif et la durée de vie du réseau. On parle alors d'overhead des paquets de contrôle.

Les protocoles et applications de réseau de capteurs doivent comporter des mécanismes de sauvegarde de l'énergie en contrôlant la radio pour éviter ou réduire la perte d'énergie due aux sources ci-dessus. Eteindre la radio quand elle n'est pas nécessaire est une stratégie efficace pour la conservation d'énergie.

2.4 Critères de performance

Dans le domaine des réseaux de capteurs, la consommation d'énergie est de loin la contrainte la plus forte. La durée de vie du réseau, ainsi que ses performances (quelque soit les critères) dépendent étroitement de l'utilisation d'énergie des nœuds.

Dans [50], les auteurs proposent un modèle analytique où les capteurs passent d'un état actif à dormant de manière à économiser l'énergie consommée. Ils ont ensuite étudié les performances du réseau en considérant les critères :

- Consommation d'énergie : Il s'agit de l'énergie consommée par chaque nœud dans son état actif, à laquelle s'ajoute l'énergie nécessaire à la transmission et à la réception des données, ainsi que l'énergie nécessaire aux transitions entre états actif ou dormant.
- Capacité du réseau : taux maximal de données atteignant le nœud "Sink".
- Délai de transmission des données depuis le nœud source jusqu'au "Sink".

Quant aux auteurs de [51], ils définissent le paramètre densité d'un nœud comme étant le nombre de voisins inclus dans son rayon de communication et la densité du réseau comme étant la densité moyenne des nœuds. Ils analysent ensuite l'impact de la densité du réseau sur les deux critères de performance :

- Taux de réception : proportion de capteurs ayant reçu l'information à la suite d'une diffusion.
- Latence : temps de propagation globale d'une diffusion.

Le travail [52] analyse l'impact des conditions environnementales sur les performances des réseaux de capteurs sans fil. Les auteurs tentent de déterminer la dépendance entre **le taux de perte de paquets** et l'environnement physique

dans lequel le réseau est déployé, en considérant trois environnements différents : (i) réseau déployé à l'intérieur d'un immeuble de bureaux, (ii) dans un habitat à feuillage modéré, et (iii) dans un parking ouvert. Le taux de perte de paquets étant défini comme la proportion de paquets transmis dans un laps de temps mais n'ayant pas été reçus. Son complément étant le taux de réception. Dans un réseau de capteurs sans fil, ce critère de performance dépend de plusieurs facteurs comme l'environnement physique, l'architecture du réseau, la nature du trafic, les phénomènes physiques qui déclenchent l'activation des nœuds, la distance entre l'émetteur et le récepteur, la puissance du signal etc...

Les expériences menées par [52] concernent l'étude de performances au niveau de la couche physique et de la couche MAC. Ainsi, pour un réseau déployé à l'intérieur d'un immeuble de bureaux, 50% des liens expérimentés ont un taux de pertes supérieur à 10%, tandis que 33% des liens affichent un taux de perte supérieur à 30%. Au niveau de la couche MAC, 50% à 80% de la consommation d'énergie est utilisée pour pallier les effets néfastes des conditions environnementales et des phénomènes de collisions de paquets.

Dans [53], les auteurs utilisent le TTL (time to live) comme critère de performance pour comparer différents modèles de mobilité. Ainsi, chaque paquet a un TTL défini comme étant une quantité de temps fini et non pas comme étant le nombre de sauts traversés par le paquet au fur et à mesure qu'il se propage à travers le réseau. L'étude vise à montrer que la réception d'un paquet peut être améliorée plutôt par l'augmentation de son TTL que par l'accroissement du rayon de transmission. Lequel TTL dépend étroitement de la mobilité des nœuds.

Dans [57], les auteurs considèrent le "random waypoint model" où chaque nœud part d'un point vers une destination aléatoire avec une vitesse aléatoire comprise entre $[0; V_{max}]$. Une fois à destination, le nœud marque une pause pendant un laps de temps avant de continuer vers une autre destination choisie au hasard. Dans ce modèle, les auteurs ont définis les critères de performance suivantes :

- "Packet delivery ratio" : le taux de paquets reçus par les destinataires au regard du nombre total émis par les sources.
- "Average delay of data packets" : le délai moyen de réception des paquets depuis l'émission par la source.

Quant aux auteurs de [54], ils préfèrent utiliser les critères de performance suivants :

- "Time of first packet Loss" : Pour lever une ambiguïté par rapport au "Lifetime", ce paramètre est intéressant dans la mesure où il précise l'instant de la première perte de paquet.

- “Average throughput” : Le taux de données reçues par les noeuds destinataires.
- “Total Network Throughput” : C’est la capacité totale du réseau, c’est-à-dire le nombre de paquets transmis avec succès à leurs destinataires jusqu’au moment où aucun paquet ne peut plus être délivré via le réseau.
- “Packet Loss Ratio at Time t ” : Le pourcentage de paquets perdus jusqu’à l’instant t .
- “Threshold Related-Throughput” : Ce paramètre mesure le nombre de paquets délivrés jusqu’au moment où le “Packet Loss Ratio” dépasse pour la première fois le niveau θ où θ est un taux prédéfini $0 \leq \theta \leq 1$.

On constate alors qu’un bon critère de performance est un critère en parfaite adéquation avec les objectifs spécifiques de l’application. Ainsi, pour valider le fonctionnement du réseau, le choix des critères de performance est une étape cruciale qui ne devrait pas être négligée.

2.5 Architecture protocolaire et fonctionnalités

2.5.1 Couche physique

La couche physique est responsable du choix de la fréquence et de la modulation (et éventuellement du cryptage des données). La fréquence généralement retenue pour les réseaux de capteurs est la fréquence ISM915Mhz. La conception de la couche physique tend à donner une importance plus grande à l’économie d’énergie qu’aux effets de la propagation et d’atténuation, ce qui correspond à l’idée d’un réseau orienté économie d’énergie et non orienté délai ou bande passante comme les réseaux MANET.

La technique dite “d’étalement de spectre” a une très forte résonance dans les protocoles de réseaux sans fil actuels (802.11, 802.11b, 802.11g, Bluetooth, UMTS). L’adoption de cette technique dans les différents protocoles réseaux actuels résulte de ses nombreux avantages parmi lesquels on peut citer :

- la forte immunité aux interférences et au bruit ;
- l’élimination du phénomène de trajets multiples (Fading) ;
- le partage de la bande passante entre plusieurs utilisateurs ;
- la résistance aux interceptions (utilisation de code) ;
- l’invisibilité (transmission sous la puissance du bruit DSSS) ;
- la faible puissance d’émission.

Les techniques dites à étalement de spectre ont également pour avantage de réduire le nombre de composants analogiques nécessaires à la construction d’un

appareil d'émission de données, ce qui réduit également la puissance consommée.

Le standard IEEE 802.15.4 a été spécialement défini en fonction des caractéristiques des réseaux de capteurs, un faible débit et une faible consommation électrique. Il décrit le fonctionnement de la couche physique, et de la couche MAC.

TABLE 2.1 – IEEE 802.15.4 - Paramètres de modulation

PHY	Bande de fréquence	Données		
		Bit rate	Symbol rate	Modulation
866 MHz	868.0-868.6 MHz	20	20	BPSK
915 MHz	902.0-928.0 MHz	40	40	BPSK
2.4 GHz	2.4-2.4835 GHz	250	62.5	16-ary orthogonal

2.5.2 Sous-couche MAC

La couche liaison de données est responsable du multiplexage, de la détection, de l'accès au medium et du contrôle d'erreur. Elle assure des connexions point à point/multipoint fiables. La couche liaison définie dans la norme IEEE 802.15.4 est divisée en deux parties [Fig. 2.1], la sous-couche MAC et la sous-couche LLC standardisée dans le protocole 802.2 et commune aux protocoles 802.2, 802.11, 802.15.1 (Bluetooth). La sous-couche MAC définie dans le protocole 802.15.4 a été simplifiée par rapport aux autres protocoles IEEE 802.15.x, afin de réduire la complexité des composants matériels et par conséquent leur coût.

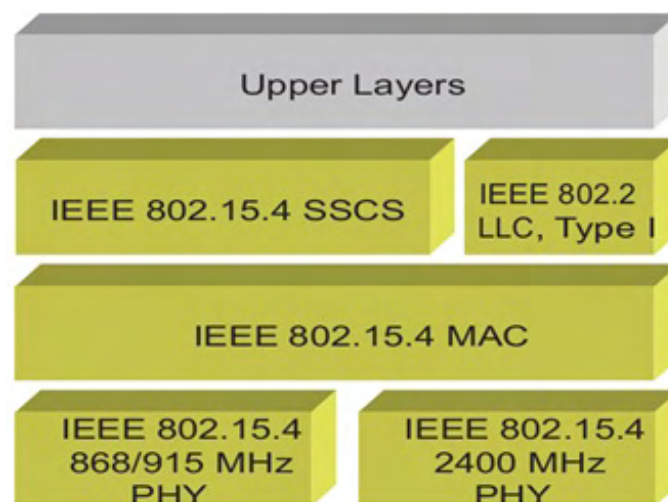


FIGURE 2.1 – Pile protocolaire IEEE 802.15.4

Les protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil peuvent être classés comme suit :

- Les protocoles à contention (de type CSMA/CA) : ex. WiseMAC, B-MAC... dont les avantages sont la flexibilité de débit et une faible complexité d'implantation.
- Les protocoles planifiés (de type TDMA) : ex. TRAMA, BMA... qui optimisent la consommation d'énergie en éliminant les collisions et les écoutes passives et abusives.
- Les solutions hybrides ex. S-MAC, T-MAC... organisées en cycles.

Il est à noter que parmi tous les protocoles proposés, aucun des trois types ne semble faire l'unanimité et ce même après une dizaine d'année de travaux de recherche. Ceci vient sans doute du fait que les solutions sont dirigées par l'application. En effet, si le but de l'application est de récupérer cycliquement des valeurs le mode TDMA serait plus adapté (trafic régulier), alors que si le but de l'application est de détecter des changements dans l'environnement, le mode CSMA répondra mieux aux variations de trafic [94].

TDMA divise le temps du canal en N slots de temps, dans chaque slot, on permet à un seul un nœud de transmettre. Les N slots composent une trame qui revient de manière cyclique. TDMA est souvent employé dans les systèmes de communication sans fil cellulaires, tels que GSM. Dans chaque cellule, une Station de Base alloue des slots de temps et fournit le timing et les informations de synchronisation à tous les nœuds mobiles. Typiquement, les nœuds mobiles communiquent seulement avec la station de base ; il n'y a pas de communication directe (pair-à-pair) entre les nœuds mobiles. L'avantage principal de TDMA est son efficacité en énergie, parce que le nœud n'a pas besoin de rester à l'écoute entre les slots qui lui sont attribués [94, 33].

Cependant, TDMA a quelques contraintes d'utilisation dans les réseaux de capteurs sans fil. TDMA exige normalement des nœuds une topologie en étoile ou la formation de clusters quand le réseau est beaucoup plus grand, analogues aux cellules dans les systèmes de communication cellulaires. Un des nœuds du cluster est choisi comme chef de cluster (CH : cluster head), et agit en tant que station de base. Cette organisation hiérarchique a plusieurs implications. Les nœuds sont normalement contraints de communiquer avec le CH ; la communication pair-à-pair n'est pas directement possible.

Beaucoup de variantes du protocole TDMA sont possibles. Plutôt que des slots programmés, les slots peuvent être alloués pour la réception avec un mécanisme de contention dans chaque slot de temps. La station de base peut affecter dynamiquement des slots trame-par-trame. Dans une configuration ad-hoc, des nœuds peuvent jouer le rôle de station de base, et ce rôle peut tourner afin d'équilibrer la

consommation d'énergie.

2.5.3 Couche réseau et routage

Dans les réseaux de capteurs sans fil, la plupart des communications sont de type “ n vers 1”. C'est-à-dire que les informations recueillies par les capteurs sont ensuite centralisées dans une passerelle (Sink ou Station de Base). Les flux qui transitent sur le réseau ont donc pour unique destination la passerelle. Les protocoles de routage développés pour les réseaux de capteurs sont alors plus simples que ceux créés pour les réseaux ad-hoc, car les problématiques liées aux communications point-à-point dans les réseaux ad-hoc augmentent la complexité des tables de routage.

Deux grandes familles de protocoles de routage ont été développées pour les réseaux de capteurs. La première famille regroupe les protocoles dont le but est de minimiser la consommation énergétique moyenne. Dans cette famille on peut citer par exemple [67] où Shah et Rabaey proposent d'utiliser une fonction de probabilité dépendant de la consommation énergétique qu'exige chaque route pour sélectionner les chemins favorisant l'allongement de la durée de vie du réseau.

La seconde famille regroupe pour sa part les protocoles dont le but est de limiter les flux applicatifs transitant sur le réseau. En minimisant ainsi les flux, le protocole permet d'économiser de l'énergie. Cette famille intègre les protocoles de type “data-centric” comme SPIN [68], Directed Diffusion [19],[69], Rumor Routing [71], COUGAR [72] et ACQUIRE [73]. Elle comprend aussi les protocoles de type “Network flow” et “QoS-aware protocol” comme l'algorithme MLDA (Maximum Lifetime Data Aggregation) [74], CMLDA [75], le protocole Minimum cost forwarding [76], Sequential assignment routing (SAR) [77] et SPEED [78].

Il y a aussi les protocoles de routage géographique où les informations de localisation sont nécessaires soit pour orienter les paquets vers une destination bien précise ou bien pour prendre en compte les distances inter-noeuds afin de mieux estimer l'énergie consommée. Parmi les protocoles de routage géographique, on peut citer de manière non exhaustive : Minimum Energy Communication Network (MECN) [79], SMECN [80], Geographic Adaptive Fidelity (GAF) [178], Geographic and Energy-Aware Routing (GEAR) [179] et Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [81].

Ces dernières années, beaucoup de travaux de recherche se sont intéressés à la répartition de charge dans les protocoles de routage destinés aux réseaux de

capteurs. Dans ce type de protocoles [35], les paquets issus d'un même noeud source, empruntent des routes différentes pour atteindre la même destination finale. Ce qui permet la contribution de plusieurs nœuds dans l'effort qu'exige le routage.

2.6 Techniques d'agrégation et formation de clusters

Dans les RCSF, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation.

Compte tenu de leur bénéfice en termes d'efficacité énergétique, les deux fonctions d'agrégation les plus importantes pour les réseaux de capteurs sont l'agrégation de données et le regroupement des nœuds en cluster.

2.6.1 Agrégation de données

Les capteurs étant caractérisés par leur durée de vie très limitée, à cause de la capacité limitée de leurs batteries, le but est de réduire la consommation d'énergie en éliminant la redondance de données. Ce qui permet ainsi de réduire le nombre de transmissions en combinant les données arrivant des différents nœuds dans des points d'agrégation. Selon le type d'application des réseaux de capteurs, l'agrégation de données est un procédé fondamental permettant de résoudre le problème de redondance de données à transmettre via le réseau. En effet, dans une application de type relevé de température par exemple, plusieurs nœuds peuvent être amenés à envoyer la même information via le réseau. En appliquant le principe d'agrégation de données, les nœuds intermédiaires éliminent ainsi les données redondantes de manière à réduire considérablement la quantité de données transitant via le réseau tout en transmettant l'information "utile".

L'efficacité du principe d'agrégation de données peut être mesurée à travers différentes métriques [55] :

- "Accuracy" : C'est la précision, l'exactitude, elle mesure la différence entre la donnée reçue par le sink et la vraie valeur qu'il aurait dû recevoir (puisque toutes les données n'ont pas été transmises).

- “Completeness” : C’est le pourcentage des données incluses dans “l’agrégat” final par rapport aux données relevées.
- “Latency” : L’agrégation de données peut accroître la latence au niveau des noeuds intermédiaires qui appliquent le principe d’agrégation.
- “Reduced Message overhead” : L’intérêt de l’agrégation de données repose essentiellement sur la réduction de la quantité de données transitant via le réseau, ce qui permet d’économiser de l’énergie et d’accroître ainsi la durée de vie du réseau.

Les questions auxquelles doit répondre le principe d’agrégation sont :

- Quelles fonctions d’agrégation utiliser ? Comment les catégoriser ?
- Comment former l’arbre d’agrégation, où doivent être placés les noeuds d’agrégation ?
- Combien de temps devra attendre un noeud d’agrégation pour la collecte de données avant d’appliquer les fonctions d’agrégation ?
- A quoi devra ressembler une interface permettant d’exprimer facilement les actions d’agrégation ?

La demande d’agrégation peut être exprimée par des clauses SQL adéquates de type [55] :

```

SELECT {agg(expr), attributes} FROM sensors
WHERE {selectionPredicates}
GROUP BY {attributes}
HAVING {havingPredicates}
EPOCH DURATION i

```

FIGURE 2.2 – Clause SQL d’agrégation de données

On retrouve différentes catégories de fonctions d’agrégation :

- “Duplicate sensitive” : Il s’agit de fonctions sensibles au dédoublement. En effet, le résultat de la fonction est altérée si la valeur mesurée par un noeud particulier est prise en compte dans le calcul de la fonction plus d’une fois. Dans cette catégorie, on retrouve, par exemple, les fonctions SOMME, MEDIANE et MOYENNE.
- “Summary” : Une fonction est de type “summary”, si elle est fonction de l’ensemble des valeurs relevées par les noeuds ; par exemple, la fonction SOMME.
- “Exemplary” : MIN et MAX sont dans la catégorie de fonctions “exemplary”.
- “Composable” : Une fonction d’agrégation est dite composable si, le résultat de f appliquée à un ensemble $\bar{\omega}$, peut être connu en appliquant f à une partition de $\bar{\omega}$ via une fonction auxiliaire $g : f(\bar{\omega}) = g(f(\omega_1), f(\omega_2))$ où $\bar{\omega} = \omega_1 \cup \omega_2$ avec $\omega_1 \cap \omega_2 = \emptyset$.

Selon [55], l'agrégation devrait être effectuée au plus près de la source afin d'en tirer meilleur bénéfice. De plus, un nœud d'agrégation ne devrait pas attendre trop longtemps avant d'appliquer les fonctions d'agrégation. Car plus l'attente est longue, plus est grande la quantité de données à prendre en compte dans le calcul de l'agrégat : ce qui signifierait une sur-consommation d'énergie. Pour éviter ce problème, des mécanismes doivent être élaborés afin de trouver un meilleur compromis.

2.6.2 Organisation en clusters

L'organisation des réseaux de capteurs sans fil en clusters est une forme d'approche de "Topology Control" qui par le biais de l'agrégation de nœuds en clusters, permet de réduire la complexité des algorithmes de routage, d'optimiser les ressources du réseau, de faciliter l'agrégation en faisant gérer, localement, certaines fonctionnalités par un chef de clusters [36, 95]. On peut classer les algorithmes de formation de clusters en [33] :

- "implicites" : Les nœuds se constituent en groupes.
- "explicites" : Les nœuds se constituent en groupes autour d'un chef de cluster.
- "actifs" : Les clusters sont le résultat de l'exécution d'un protocole dédié.
- "passifs" : Les clusters se forment en déduisant des informations sur la topologie du réseau en écoutant les messages MAC utilisés pour transmettre le trafic de données.
- "hiérarchiques (clusters de clusters)" ou "non hiérarchiques" ;
- "centralisés" ou "distribués" : Les algorithmes distribués étant éventuellement émergents s'ils permettent d'obtenir un résultat global prévisible de manière déterministe ou stochastique.

Au sein de cette classification, il existe deux types de protocoles de formation de clusters. Ceux qui produisent des clusters simple-saut (ou uni-saut) où chaque nœud pourrait communiquer directement avec son chef de cluster (appelé cluster head) et les protocoles produisant des clusters multi-sauts où un nœud peut communiquer avec son cluster head en plusieurs sauts. Dans le cas des clusters multi-sauts, le nombre maximal de sauts peut être borné par un paramètre d fixé par le gestionnaire du réseau. On parle alors de la formation de d – *Clusters*. Si le réseau est entièrement clustérisé, c'est-à-dire que chaque nœud du réseau appartient à un cluster et se trouve à, au plus, d sauts de son cluster head, alors l'ensemble S des CH constitue un sous ensemble d – *dominant* du graphe que constitue le réseau entier.

En général, les algorithmes de formation de clusters se décomposent en une phase de sélection des CH, suivie d'une phase de formation des clusters par la relation de filiation noeud-CH, et enfin d'une phase de maintenance. Cette dernière est particulièrement importante lorsque le réseau subit des changements ou quand les nœuds sont mobiles. Souvent, les deux premières phases supposent que le réseau est stable de par les nœuds qui le composent, et que ceux-ci soient quasiment immobiles.

2.7 Conclusion

Dans ces deux premiers chapitres, nous avons procédé à l'étude des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons posé les idées de base qui guident la conception de toute solution destinée aux réseaux de capteurs sans fil.

Ainsi, minimiser la consommation d'énergie de chaque capteur permettra d'accroître la durée de vie globale du réseau. Même si derrière la notion de durée de vie se cachent différentes définitions plus ou moins adaptées au contexte spécifique de leurs applications respectives.

Dans le prochain chapitre, nous dresserons un panorama des techniques de conservation d'énergie proposées dans la littérature afin de prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs.

Chapitre 3

Techniques d'optimisation de la consommation d'énergie dans les WSNs : État de l'art

3.1 Introduction

Les opérations d'émission et de réception consomment une grande partie d'énergie des nœuds capteurs. À cet effet, plusieurs approches ont été proposées pour conserver la ressource énergétique au niveau des capteurs et pouvoir surmonter les défis inhérents à sa limitation. La durée de vie est sans doute la métrique la plus importante dans l'évaluation des performances d'un réseau de capteurs. En effet, dans un environnement contraint, toute ressource limitée doit être prise en compte. Toutefois, la durée de vie du réseau, comme mesure de la consommation d'énergie, occupe une place exceptionnelle puisqu'elle constitue la borne supérieure de l'utilité de ce réseau [166], [109].

Maximiser la durée de vie du réseau revient à réduire la consommation énergétique des nœuds. Malgré les progrès qui ont été faits, la durée de vie de ces dispositifs à batteries continue d'être un défi majeur et un facteur clé, exigeant davantage de recherches sur l'efficacité énergétique des plates-formes et des protocoles de communication.

Après la description des principales causes de surconsommation d'énergie dans les RCSF, nous présentons dans ce chapitre les différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation.

3.2 Durée de vie d'un réseau de capteurs

De par la nature-même des RCSF, les capteurs ont une autonomie limitée et une faible capacité de calcul. Ceci induit de nombreux problèmes, en particulier comment maintenir un niveau opérationnel du réseau le plus longtemps possible. La durée de vie prévue est critique dans tout déploiement de réseau de capteurs. Le but des scénarios applicatifs classiques consiste à déployer des nœuds dans un domaine sans surveillance pendant des mois ou des années.

La vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle le réseau peut, selon le cas : maintenir assez de connectivité, couvrir le domaine entier, ou garder le taux de perte d'information en-dessous d'un certain niveau. La vie du système est donc liée à la vie nodale, même si elle peut en différer. La vie nodale correspond à la vie d'un nœud du réseau. Elle dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie qu'il consomme en fonction du temps et la quantité d'énergie dont il dispose. Selon la discussion de Akyildiz et al. [110], la quantité prédominante d'énergie est consommée par un nœud capteur durant la détection, la communication puis le traitement des données. Il existe différentes définitions pour la durée de vie d'un réseau de capteurs (fondées sur la fonctionnalité désirée). Elle peut être définie par la durée jusqu'au moment où le premier nœud meurt. Elle peut également être définie par le temps jusqu'au moment où une proportion de nœuds meurt. Si la proportion de nœuds morts dépasse un certain seuil, cela peut avoir comme conséquence la noncouverture de sous-régions et/ou le partitionnement du réseau. Les définitions proposées dans la littérature sont les suivantes :

1. La durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie [55, 111, 10, 112, 113] ;
2. La durée jusqu'à ce que le premier clusterhead épuise toute son énergie [20, 114] ;
3. La durée jusqu'à ce qu'il reste au plus une certaine fraction β de nœuds survivants dans le réseau [2, 115, 116] ;
4. Demi-vie du réseau : la durée jusqu'à ce que 50% des nœuds épuisent leur batterie [55] ;
5. La durée jusqu'à ce que tous les capteurs épuisent leur énergie [118] ;
6. La durée jusqu'à ce que le réseau soit partitionné : apparition de la première division du réseau en deux (ou plus). Cela peut correspondre aussi à la mort du premier nœud (si celui-ci tient une position centrale) ou plus tard si la topologie du réseau est plus robuste [55] ;

7. k -couverture : la durée pendant laquelle la zone d'intérêt est couverte par au moins k noeuds [174] ;
8. 100%-couverture
 - (a) La durée pendant laquelle chaque cible est couverte par au moins un nœud [119, 120] ;
 - (b) La durée pendant laquelle l'ensemble de la zone est couverte par au moins un nœud [121, 117] ;
9. α -couverture
 - (a) La durée cumulée, au bout de laquelle au moins une portion α de la région est couverte par au moins un nœud [122, 123, 124] ;
 - (b) La durée pendant laquelle la couverture tombe en-dessous d'un seuil prédéfini α [125] ;
 - (c) La durée de fonctionnement continu du système avant que la couverture ou la proportion de paquets reçus tombent en-dessous d'un seuil prédéfini [126, 15] ;
10. La durée pendant laquelle un pourcentage donné de nœuds possèdent un chemin vers la Station de Base [15].
11. L'espérance de l'intervalle complet pendant lequel la probabilité de garantir simultanément une connectivité et une k -couverture est au moins α [174] ;
12. La durée jusqu'à la perte de la connectivité ou de la couverture [127, 8, 128] ;
13. La durée jusqu'à ce que le réseau ne fournisse plus un taux acceptable de détection d'événements [118] ;
14. La durée pendant laquelle le réseau satisfait continuellement les besoins de l'application [129, 130, 131].

Aucune de ces définitions de la durée de vie du réseau ne tient compte de toutes les exigences de l'application et les influences environnementales. En règle générale, la durée de vie réelle du réseau est approximée selon un ensemble de conditions très spécifiques. Cependant, nous constatons bien que plusieurs définitions convergent puisque certaines d'entre elles ne sont que des relaxations des autres et la majorité suggère que la durée de vie du réseau dépend de la consommation d'énergie de ses nœuds. Toutefois, il peut s'avérer judicieux d'introduire une métrique pour affiner ou choisir une de ces définitions telle que la fiabilité, la couverture, la robustesse, etc. Ce que l'on peut également constater c'est que la définition même de la durée de vie va dépendre de l'application dévolue au réseau de capteurs.

L'emplacement des nœuds défaillants est également important. Si la proportion de nœuds qui ont manqué d'énergie est située dans une certaine partie critique du réseau, par exemple, reliant le nœud central (Station de Base) et le reste du réseau, cela peut avoir comme conséquence le dysfonctionnement précoce du réseau entier [177, 132].

Il convient de noter que la simulation de la durée de vie du réseau peut être un problème statistique difficile. De toute évidence, plus ces durées sont longues, meilleur est le fonctionnement du réseau. De manière plus générale, il est possible de chercher à estimer le complémentaire de la fonction de répartition des durées de vie des nœuds (avec la probabilité qu'un nœud survive un temps donné), ou la survie relative d'un réseau (à quel moment tel pourcentage de nœuds est encore opérationnel).

3.3 Techniques du Duty-cycling

Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille (low-power) à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. Idéalement, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et ou à recevoir, et devrait être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu. Ainsi, les nœuds alternent entre périodes actives et de sommeil en fonction de l'activité du réseau. Ce comportement est généralement dénommé Duty-cycling. Un Duty-cycle est défini comme étant la fraction de temps où les nœuds sont actifs.

Comme les nœuds capteurs effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnancement Sommeil/Réveil accompagne donc tout plan de Duty-cycling. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué reposant sur les dates auxquelles des nœuds décident de passer de l'état actif et l'état sommeil et vice-versa. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui rend possible l'échange de paquets, même si les nœuds ont un faible duty-cycle (i.e., ils dorment la plupart du temps).

3.3.1 Protocoles Sleep/Wakeup

Comme mentionné précédemment, un régime sleep/wakeup peut être défini pour un composant donné (i.e. le module Radio) du nœud capteur. On peut relever les principaux plans sleep/wakeup implantés sous forme de protocoles indépendants

au-dessus du protocole MAC. Dans le document [134], les protocoles sleep/wakeup sont divisés en trois grandes catégories : à la demande, rendez-vous programmés, régimes asynchrones.

- Les protocoles à la demande utilisent l’approche la plus intuitive pour la gestion d’énergie. L’idée de base est qu’un nœud devrait se réveiller seulement quand un autre nœud veut communiquer avec lui. Le problème principal associé au régime à la demande est de savoir comment informer un nœud en sommeil qu’un autre nœud est disposé à communiquer avec lui. À cet effet, ces systèmes utilisent généralement plusieurs radios avec différents compromis entre énergie et performances (i.e. une radio à faible débit et à faible consommation pour la signalisation, et une radio à ”haut” débit mais à plus forte consommation pour la communication de données). Le protocole STEM (Sparse Topology and Energy Management) [23], par exemple, utilise deux radios ;
- Une autre solution consiste à utiliser une approche de rendez-vous programmés. L’idée est que chaque nœud doit se réveiller en même temps que ses voisins. Typiquement, les nœuds se réveillent suivant un ordonnancement de réveil et restent actifs pendant un court intervalle de temps pour communiquer avec leurs voisins. Ensuite, ils se rendorment jusqu’au prochain rendez-vous ;
- Enfin, un protocole sleep/wakeup asynchrone peut être utilisé. Avec les protocoles asynchrones, un nœud peut se réveiller quand il veut et tant qu’il est capable de communiquer avec ses voisins. Ce but est atteint par des propriétés impliquées dans le régime sleep/wakeup, aucun échange d’informations n’est alors nécessaire entre les nœuds. Quelques régimes sleep/wakeup asynchrones sont proposés dans [135].

3.3.2 Protocoles du niveau MAC

Plusieurs protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil ont été proposés, et de nombreux états de l’art et introductions aux protocoles MAC sont disponibles dans la littérature (par exemple, [136, 137, 138]). Nous nous concentrons principalement sur les questions de gestion d’énergie plutôt que sur les méthodes d’accès au canal. La plupart des protocoles mettent en œuvre un régime avec un faible duty-cycle pour gérer la consommation d’énergie. Nous avons recensés les protocoles MAC les plus communs en les classant en trois catégories : les protocoles fondés sur TDMA, les protocoles utilisant la contention et les protocoles hybrides.

3.3.2.1 Protocoles MAC basés sur TDMA

Dans les protocoles MAC fondés sur la méthode TDMA [139, 140, 171, 141] le temps est divisé en trames (périodiques) et chaque trame se compose d'un certain nombre de slots de temps. À chaque nœud est attribué un ou plusieurs slots par trame, selon un algorithme d'ordonnancement approprié. Il utilise ces slots pour l'émission/réception de paquets de/vers d'autres nœuds. Dans de nombreux cas, les nœuds sont regroupés pour former des clusters avec un clusterhead qui est chargé d'attribuer les slots de temps pour les nœuds de son cluster (par exemple, Bluetooth [140], LEACH [171], et Energy-aware TDMA-based MAC [139]).

Exemple : un des protocoles TDMA importants et efficaces en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil est TRAMA [141]. TRAMA divise le temps en deux parties, une période avec un accès aléatoire et une période avec un accès ordonné. La période d'accès aléatoire est consacrée à la réservation des slots et l'accès au canal est fondé sur la contention. A contrario, la période d'accès ordonnée est constituée d'un ensemble de slots de temps attribués aux nœuds. L'algorithme de réservation des slots est le suivant. Tout d'abord, les nœuds cherchent des informations sur un voisinage à deux sauts, qui sont nécessaires pour établir un ordonnancement sans collisions. Ensuite, les nœuds commencent une procédure d'élection afin d'associer chaque slot à un seul nœud. Chaque nœud a une priorité pour être le propriétaire d'un slot. Cette priorité est calculée avec une fonction de hachage de l'identifiant du nœud et du numéro du slot. Le nœud avec la plus grande priorité devient le propriétaire du slot. Enfin, les nœuds envoient un paquet de synchronisation contenant la liste des voisins destinataires pour les transmissions suivantes. Par conséquent, les nœuds peuvent se mettre d'accord sur les slots où ils doivent être éveillés. Les slots inutilisés peuvent être annoncés par leurs propriétaires pour être réutilisés par d'autres.

Les protocoles TDMA sont, par nature, efficaces en énergie, puisque les nœuds n'allument leur radio que lors de leurs propres slots et s'endorment le reste du temps. Toutefois, dans la pratique, les protocoles TDMA ont plusieurs inconvénients qui compensent les avantages en terme d'économie d'énergie [142]. Premièrement, les algorithmes classiques de réservation de slots ont tendance à être complexes, peu flexibles et présentent des problèmes de passage à l'échelle. En effet, dans un véritable réseau de capteurs, les changements de topologie sont fréquents (conditions variables du canal, défaillances de nœuds, etc.) et la répartition des slots peut être problématique. Donc dans de nombreux cas, une approche centralisée peut être adoptée (LEACH [171]). Deuxièmement, ils requièrent une synchronisation

très fine et ils sont très sensibles aux interférences [143]. En outre, les protocoles TDMA fonctionnent moins bien que les protocoles avec contention lors d'un trafic faible. C'est pour toutes ces raisons que les protocoles MAC TDMA ne sont pas très fréquemment utilisés dans les réseaux de capteurs.

3.3.2.2 Protocoles MAC avec contention

Les protocoles avec contention sont les plus populaires et représentent la majorité des protocoles MAC proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Ils assurent le duty-cycle par une intégration étroite des fonctionnalités d'accès au canal avec un régime sleep/wakeup. La seule différence est que, dans ce cas, l'algorithme sleep/wakeup n'est pas un protocole indépendant.

Exemples : un des plus populaires est B-MAC (MAC Berkeley) [144], avec une faible complexité et une faible consommation induite par le système d'exploitation TinyOS [59]. L'objectif de B-MAC est de fournir quelques fonctionnalités de base et un mécanisme efficace en énergie pour l'accès au canal. Il met d'abord en œuvre les caractéristiques de base du contrôle d'accès au canal : un algorithme de backoff, une estimation efficace du canal et des acquittements optionnels. Deuxièmement, pour atteindre un faible duty-cycle, B-MAC utilise un plan sleep/wakeup asynchrone fondé sur l'écoute périodique appelée Low Power Listening (LPL). Les nœuds se réveillent périodiquement pour vérifier l'activité sur le canal. La période entre deux réveils est appelée intervalle de vérification. Après le réveil, les nœuds restent actifs pour un temps de réveil, afin de détecter d'éventuelles transmissions. Contrairement au temps de réveil qui est fixé, l'intervalle de vérification peut être spécifié par l'application. Les paquets B-MAC sont constitués d'un long préambule et d'une charge utile. La durée du préambule est au moins égale à l'intervalle de vérification, afin que chaque nœud puisse toujours détecter une éventuelle transmission au cours de son intervalle de vérification. Cette approche ne nécessite pas que les nœuds soient synchronisés. En fait, quand un nœud détecte l'activité sur le canal, il reste actif et reçoit le préambule en premier puis la charge utile.

Un autre protocole MAC multi-sauts célèbre dans les réseaux de capteurs est S-MAC (Sensor-MAC) [172]. Il adopte un régime de communication avec planification par rendez-vous. Les nœuds échangent des paquets de synchronisation afin de coordonner leurs périodes sleep/wakeup. Chaque nœud peut établir son propre plan ou suivre le plan d'un voisin au moyen d'un algorithme distribué. Les nœuds utilisant le même plan forment un cluster virtuel. Un nœud peut éventuellement

suivre deux plans s'ils ne se superposent pas, de sorte qu'il puisse faire un pont de communication entre différents clusters virtuels. Le temps d'accès au canal est divisé en deux parties. Dans la période d'écoute, les nœuds échangent des paquets de synchronisation et des paquets de contrôle pour éviter des collisions. Le transfert de données aura lieu dans le reste de la période. Les nœuds source et destination sont éveillés et communiquent entre eux. Les nœuds qui ne sont pas concernés par cette communication peuvent dormir jusqu'à la prochaine période d'écoute.

Pour éviter des latences élevées dans des environnements multi-sauts, S-MAC utilise un plan d'écoute adaptatif. Les paramètres du protocole S-MAC, i.e. les périodes d'écoute et de sommeil, sont constantes et ne peuvent pas être modifiées après le déploiement. Les auteurs de [145] proposent alors une version améliorée de S-MAC appelée Timeout MAC (T-MAC) et spécialement conçue pour une charge de trafic variable. Bien que les protocoles MAC fondée sur le duty-cycle soient efficaces en énergie, ils souffrent de la latence du sommeil, i.e., un nœud doit attendre que le récepteur se réveille avant qu'il puisse lui envoyer un paquet. Cette latence augmente avec le nombre de sauts. En outre, la diffusion de données à partir d'un nœud vers le puits peut connaître un problème d'interruption. En fait, la sensibilité de la radio limite la portée de l'overhearing. Les nœuds en dehors de la portée de l'émetteur ne peuvent donc pas entendre la transmission en cours et se rendorment. C'est pourquoi, dans S-MAC et T-MAC la diffusion de données est limitée à quelques sauts.

IEEE 802.15.4 [146] est un standard à faible débit et à faible puissance pour les réseaux personnels (PAN pour Personal Area Networks). Un PAN est formé d'un PAN coordinator qui gère l'ensemble du réseau et, éventuellement, d'un ou plusieurs coordinateurs qui gèrent les sous-ensembles de nœuds du réseau. D'autres nœuds (ordinaires) doivent s'associer à un coordinateur afin de communiquer. Les topologies de réseau possibles sont l'étoile (saut unique), le cluster-tree et le mesh (multi-sauts). Le standard IEEE 802.15.4 prend en charge deux méthodes d'accès aux différents canaux : un mode beacon-enabled et un mode non-beacon enabled. Le mode beacon enabled fournit un mécanisme de gestion d'énergie sur la base du duty-cycle. Concrètement, il utilise une structure de supertrame qui est délimitée par des balises. D'autres trames de synchronisation sont générées périodiquement par les nœuds coordinateurs. Chaque supertrame consiste en une période active et une période inactive. Dans la période d'activité les dispositifs communiquent avec le coordonnateur auquel ils sont associés. La période active peut être divisée en une période d'accès avec contention (CAP pour Contention Access Period) et une

période sans contention (CFP). Au cours de la CAP un algorithme CSMA/CA discrétisé est utilisé pour accéder au canal, tandis que, durant la CFP, un certain nombre de slots garantis (GTS) peuvent être attribués à chaque nœud. Au cours de la période inactive les dispositifs entrent en mode faible puissance pour économiser l'énergie. Dans le mode non-beacon enabled, il n'y a pas de structure en supertrame, i.e. les nœuds sont toujours à l'état actif et utilisent l'algorithme Unslotted CSMA/CA pour l'accès au canal et la transmission de données. Dans ce cas, la conservation d'énergie a lieu au niveau des couches supérieures.

Les protocoles fondés sur la contention sont robustes et garantissent le passage à l'échelle. En outre, ils ont généralement un délai plus faible que ceux reposant sur TDMA et ils peuvent facilement s'adapter aux conditions de trafic. Malheureusement, leur consommation d'énergie est plus élevée que celle des protocoles TDMA à cause de la contention et des collisions. Des mécanismes Duty-cycle peuvent contribuer à réduire la surconsommation d'énergie, mais ils doivent être conçus avec soin pour être flexibles et à faible latence.

3.3.2.3 Protocoles MAC hybrides

L'idée de base des protocoles MAC hybrides (changement du comportement du protocole entre TDMA et CSMA en fonction du niveau de contention) n'est pas nouvelle. Concernant les réseaux de capteurs sans fil, Z-MAC [142] est l'un des protocoles les plus intéressants. Afin de définir le schéma principal du contrôle de transmission, Z-MAC commence par une phase préliminaire de configuration. Chaque nœud construit une liste de voisins à deux sauts par le biais du processus de découverte de voisins. Puis, un algorithme distribué d'attribution des slots est appliqué pour faire en sorte que deux nœuds dans un voisinage à deux sauts ne soient pas affectés au même slot. Par conséquent, on est assuré qu'une transmission d'un nœud avec un de ses voisins à un saut n'interfère pas avec les transmission de ses voisins à deux sauts.

Z-MAC permet à chaque nœud de maintenir son propre ordonnancement qui dépend du nombre de voisins et évite tout conflit avec ses voisins de contention. Chaque nœud a des informations sur les slots de tous ses voisins à deux sauts et tout le monde se synchronise sur un slot de référence. Après cette phase d'initialisation, les nœuds sont prêts pour l'accès au canal. Les nœuds peuvent être soit en mode faible niveau de contention (LCL : Low Contention Level), soit en mode haut niveau de contention (HCL : High Contention Level). Un nœud persiste dans le mode LCL sauf s'il a reçu une notification (ECN : Explicit Contention Notification

). Dans le mode HCL, seuls les propriétaires du slot et leurs voisins à deux sauts sont autorisés à concourir pour l'accès au canal. En LCL, à la fois les propriétaires et les non-propriétaires, peuvent concourir pour transmettre dans n'importe lequel des slots. En revanche, les propriétaires ont une priorité sur les autres. De cette façon, Z-MAC peut atteindre un niveau élevé d'utilisation du canal, même en faible contention, car un nœud peut transmettre dès que le canal est disponible.

Les protocoles hybrides tentent de combiner les point forts des protocoles MAC fondés sur TDMA et ceux avec contention tout en compensant leurs faiblesses. Toutefois, ces techniques semblent être complexes pour être réalisables dans un déploiement d'un grand nombre de nœuds.

3.4 Techniques centrées sur les données

Généralement, les plans Duty-cycling ne tiennent pas compte des données prélevées par les nœuds. Par conséquent, des approches orientées données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité en énergie. En fait, la détection (ou prélèvement de données) affecte la consommation d'énergie de deux manières :

- Des échantillons inutiles : les données échantillonnées ont souvent de fortes corrélations spatiales et/ou temporelle [147], il est donc inutile de communiquer les informations redondantes à la Station de Base. Un échantillonnage inutile implique une consommation d'énergie à son tour inutile. En effet, même si le coût de l'échantillonnage est négligeable, cela induit aussi des communications tout le long du chemin qu'emprunte le message.
- La consommation électrique du module de détection : réduire la communication ne suffit pas lorsque le capteur est lui-même très consommateur.

Des techniques orientées données sont conçues pour réduire la quantité d'échantillonnage de données en garantissant un niveau de précision acceptable dans la détection pour l'application.

3.4.1 Réduction des données

Réduire les données en terme de volume ou de nombre de paquets, dans le réseaux peut avoir un impact significatif sur la consommation d'énergie due à la communication. Parmi les méthodes de réductions de données, nous trouvons le In-network processing qui consiste à réaliser de l'agrégation de données (par exemple, calculer la moyenne de certaines valeurs) au niveau des nœuds intermédiaires entre la source

et le Sink. Ainsi, la quantité de données est réduite tout en parcourant le réseau vers le Sink. Une agrégation de données appropriée est spécifique à l'application. Un état de l'art sur les techniques In-network processing est présenté dans [148].

La compression de données peut être appliquée également pour réduire la quantité d'informations transmises par les nœuds sources. Ce régime implique l'encodage d'informations au niveau des nœuds qui engendrent des données, et le décodage au niveau du Sink. Il existe différentes méthodes de compression de données citées dans [21].

3.4.2 Acquisition de données efficace en énergie

De nombreuses applications émergentes ont de réelles contraintes dues à la détection. Ceci va à l'encontre de l'hypothèse générale selon laquelle la détection n'est pas significative d'un point de vue consommation d'énergie. En fait, la consommation d'énergie du module de détection peut, non seulement être significative, mais encore supérieure à la consommation d'énergie de la radio ou même plus grande que la consommation d'énergie du reste du nœud capteur [22]. Cela peut être dû à différents facteurs [168].

- Transducteur gourmand en énergie : Certains capteurs ont intrinsèquement besoin d'une forte puissance pour accomplir de leur tâche d'échantillonnage. Par exemple, des capteurs d'images CMOS, voire des capteurs multimédia [149], ont généralement besoin de beaucoup d'énergie. Les capteurs chimiques ou biologiques peuvent aussi être gourmands en énergie.
- Convertisseurs A/D gourmands : des capteurs tels que les transducteurs acoustiques et sismiques [151] nécessitent généralement des convertisseurs A/D à haut débit et à grande résolution. La consommation d'énergie des convertisseurs représente la part la plus importante de la consommation d'énergie du sous-système de détection.
- Capteurs actifs : Une autre classe de capteurs peut obtenir des données du phénomène perçu par l'utilisation de transducteurs actifs (par exemple, sonar, radar ou laser). Dans ce cas, les capteurs doivent envoyer un signal de sondage afin d'obtenir des informations sur la grandeur observée, comme dans [150].
- Temps d'acquisition long : Le temps d'acquisition peut être de l'ordre de plusieurs centaines de millisecondes, voire de quelques secondes. Par conséquent, l'énergie consommée par le sous-système de détection peut être élevé, même si la consommation d'énergie du détecteur reste modérée.

Dans ce cas, réduire les communications peut s'avérer insuffisant, mais les stratégies de conservation d'énergie doivent réellement réduire le nombre d'acquisitions (échantillons de données). Il faudrait également préciser que les techniques d'acquisition de données efficaces en énergie ne visent pas exclusivement à réduire la consommation d'énergie du module de détection. En réduisant les données prélevées par des nœuds sources, elles diminuent aussi le nombre de communications. En fait, beaucoup de techniques d'acquisition de données efficaces en énergie ont été conçues pour réduire au minimum l'énergie consommée par la radio, en supposant que la consommation de la radio est négligeable.

Une classification des approches d'acquisition de données efficaces en énergie est proposée dans [168] :

- Comme les échantillons mesurés peuvent être corrélés, les techniques d'échantillonnage adaptatif exploitent de telles similitudes pour réduire la quantité de données à acquérir par le transducteur. Par exemple, les données intéressantes peuvent changer lentement en fonction du temps. Dans ce cas, des corrélations temporelles peuvent être exploitées pour réduire le nombre d'acquisitions. Une approche semblable peut être appliquée lorsque le phénomène étudié ne change pas brusquement entre les régions couvertes par des nœuds voisins. L'énergie due au prélèvement (et à la communication) peut être alors réduite en profitant des corrélations spatiales entre les données prélevées. Clairement, des corrélations temporelles et spatiales peuvent être conjointement exploitées pour réduire sensiblement la quantité de données à acquérir.
- L'approche d'échantillonnage hiérarchique suppose que les nœuds sont équipés de sondes (ou détecteurs) de différents types. Alors que chaque sonde est caractérisée par une résolution donnée et sa consommation d'énergie associée, cette technique choisit dynamiquement la classe à activer, afin d'obtenir un compromis entre la précision et l'économie d'énergie.
- Enfin, l'échantillonnage actif fondé sur un modèle de phénomène adopte une approche semblable à la prévision de données. Un modèle du phénomène mesuré est établi lors des prélèvements de données, de telle sorte que les valeurs futures puissent être prévues avec une certaine précision. Cette approche exploite le modèle obtenu pour réduire le nombre d'échantillons de données, et également la quantité de données à transmettre à la Station de Base bien que ce ne soit pas leur objectif principal.

3.5 Techniques hiérarchiques

Lorsque la taille du réseau devient de plus en plus importante, sa gestion devient plus difficile. Cela peut même poser des problèmes de passage à l'échelle. Les protocoles de routage plat fonctionnent bien quand le réseau ne comprend pas un grand nombre de nœuds. La structuration d'un réseau est un des outils principaux pour économiser l'énergie dans chaque nœud du réseau, ce qui aboutit à prolonger la vie du système. Une des structures les plus connues est la hiérarchisation. La technique de hiérarchisation sert à partitionner le réseau en sous ensembles afin de faciliter la gestion du réseau, surtout le routage qui se réalise à plusieurs niveaux. Dans ce type de protocoles, la vue du réseau devient locale ; certains nœuds peuvent avoir des rôles supplémentaires. La littérature comprend plusieurs contributions dans les techniques de hiérarchisation du réseau, que nous avons classées, dans l'intérêt de faciliter leur comparaison.

Un cluster est défini par un ensemble de nœuds et possède un nœud appelé nœud-chef ou Cluster Head (CH). Le rôle du CH est de faire le relais entre les nœuds du cluster et la station de base directement ou via d'autres CHs. Une zone est définie par un ensemble de nœuds mais ne possède pas un nœud-chef (ou CH). Ainsi, un cluster est une sous-classe d'une zone.

La construction des groupes (zones ou clusters) s'appuie sur des informations du réseau, exigeant donc son instrumentation. Ces informations peuvent être, dans certaines circonstances, statiques (comme la position des capteurs dans un système fixe) ou variables (comme le niveau énergétique des capteurs).

Une autre structure utilisée est la chaîne [106]. Le principe d'une chaîne est qu'un nœud ne peut communiquer qu'avec deux voisins. Nous trouvons aussi des structures qui combinent les groupes et les chaînes. En se basant sur une architecture hiérarchique, plusieurs protocoles de routage pour les réseaux de grande taille ont été proposés. Dans la suite, nous en détaillerons quelques uns.

3.5.1 Structure en clusters

La structure en clusters est la plus répandue. Elle identifie, en plus du périmètre de la zone, un nœud particulier, le cluster-head, ayant la fonction de gestionnaire du cluster. Le choix des cluster-heads est souvent dépendant de facteurs divers comme le niveau énergétique, les positions géographiques ou la connectivité.

3.5.1.1 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

Dans [171], Heinzelman et al. ont proposé un algorithme de clustering distribué appelé LEACH pour le routage dans les réseaux de capteurs homogènes. LEACH choisit aléatoirement les nœuds cluster-heads et attribue ce rôle aux différents nœuds selon la politique de gestion Round-Robin pour garantir une consommation équitable d'énergie entre les nœuds parceque le cluster-head de part, sa fonction consomme le plus. Dans le but de réduire la quantité d'informations transmises à la station de base, les cluster-heads agrègent les données capturées par les autres nœuds du cluster et envoient un paquet agrégé à la station de base.

LEACH est exécuté en deux phases : la phase “set-up” et la phase “steady-state” suivant la figure 3.1. Dans la première phase, les cluster-heads sont élus et les clusters sont formés, et dans la seconde phase, le transfert de données vers la station de base a lieu. Durant la première phase, le processus d'élection des cluster-heads est déclenché pour choisir les futurs cluster-heads. Ainsi, une fraction prédéterminée de nœuds sont élus cluster-heads selon le schéma d'exécution suivant : durant une période T , un nœud n choisit un nombre aléatoire nb dont la valeur est comprise entre 0 et 1 ($0 < nb < 1$). Si nb est inférieur à un seuil $T(i)$ (défini par la formule 3.1) alors le nœud n devient cluster-head durant la période courante, sinon le nœud n devrait rejoindre le cluster-head le plus proche dans son voisinage.

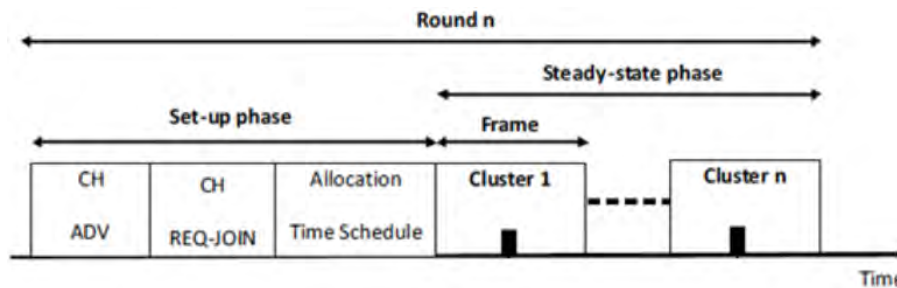


FIGURE 3.1 – Formation de clusters dans LEACH [171]

$$T(i) = \begin{cases} \frac{P}{1-P(r \bmod (\frac{1}{P}))}, & \text{si } i \text{ n'a pas été cluster-head lors des } 1/p \text{ dernières rounds} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

où, P définit le ratio de cluster-heads parmi tous les capteurs du réseau.

On note que le seuil augmente à chaque round : ainsi pour $r = 0$ (première round), $T(i) = P$ et pour la dernière round de la séquence ($r = \frac{1}{P} - 1$), $T(i) = 1$ si

le capteur n'a pas été cluster-head auparavant : un capteur est donc cluster-head toutes les $\frac{1}{P}$ dernières rounds.

La particularité de LEACH réside donc dans la non-nécessité de communication pour l'élection des cluster-heads : le choix est réalisé indépendamment lors de chaque round par une méthode probabiliste. Il est cependant nécessaire de définir manuellement un ratio de cluster-heads P parmi les capteurs.

Cependant, bien que LEACH puisse augmenter la durée de vie du réseau, il présente certaines limitations. LEACH suppose que tous les nœuds puissent transmettre des données avec une grande puissance pour atteindre la station de base et que chaque nœud a une puissance de calcul lui permettant de supporter différentes couches MAC. Par conséquent, LEACH ne convient pas aux réseaux déployés dans de vastes régions. En outre, LEACH choisit aléatoirement la liste des cluster-heads et il ne pose aucune contrainte sur leur distribution ainsi que sur leur niveau d'énergie. Ainsi, les cluster-heads peuvent se concentrer dans un même endroit et par conséquent, il pourrait exister des nœuds isolés (sans cluster-head) pouvant se déclarer. D'autre part, dans LEACH, l'agrégation des données est centralisée et est exécutée périodiquement. Or, dans certains cas, la transmission périodique des données pourrait ne pas être nécessaire, ce qui épuise rapidement l'énergie limitée des capteurs.

Une variante de LEACH appelée LEACH-C [173] a été conçue pour améliorer les performances de LEACH. Cette variante utilise une architecture centralisée pour choisir les cluster-heads tout en impliquant la station de base et l'information de localisation des capteurs. Cependant, elle augmente considérablement le surcoût du protocole puisque tous les capteurs devront envoyer leurs informations de localisation à la station de base en même temps pendant chaque phase d'élection de cluster-heads. Plusieurs travaux présentés dans la littérature [152] ont prouvé qu'une telle architecture centralisée ne passe pas à l'échelle, étant plus particulièrement appropriée à des réseaux de petite taille.

Dans [153], les auteurs ont proposé un protocole hiérarchique basé sur LEACH. Les cluster-heads formés dans LEACH sont groupés et organisés en une hiérarchie. Ils ont montré que la consommation énergétique diminue lorsque le nombre de niveaux de l'hiérarchie augmente.

3.5.1.2 TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)

Manjeshwar et Agrawal [4] ont proposé une technique de clustering appelée TEEN pour les applications critiques où le changement de certains paramètres peut être brusque. L'architecture du réseau est basée sur un groupement hiérarchique à plusieurs niveaux où les nœuds les plus proches forment des clusters. Puis ce processus de clustering passe au deuxième niveau jusqu'à ce que la station de base soit atteinte. Après la formation des clusters, chaque cluster-head transmet à ses membres deux seuils : un seuil Hard HT (hard threshold), qui est la valeur seuil du paramètre contrôlé (surveillé) et un seuil Soft ST (soft threshold) représentant une petite variation de la valeur du paramètre contrôlé. L'occurrence de cette petite variation ST permet au nœud qui la détecte de la signaler à la station de base en transmettant un message d'alerte. Par conséquent, le seuil Soft réduit le nombre de transmissions puisqu'il ne permet pas la transmission s'il y a peu ou pas de variation de la valeur du paramètre contrôlé.

Au début, les nœuds écoutent le médium continuellement et lorsque la valeur captée du paramètre contrôlé dépasse le seuil Hard, le nœud transmet l'information. La valeur captée est stockée dans une variable interne appelée SV. Puis, les nœuds ne transmettent des données que si la valeur courante du paramètre contrôlé est supérieure au seuil hard HT ou diffère du SV d'une quantité plus grande ou égale à la valeur du seuil Soft ST. Puisque la transmission d'un message consomme généralement plus d'énergie que la détection des données, alors la consommation d'énergie dans TEEN est moins importante que dans les protocoles proactifs ou ceux qui transmettent des données périodiquement tels que LEACH. Cependant, l'inconvénient principal de ce protocole est que, si les seuils HT et ST ne sont pas reçus, les nœuds ne communiquent jamais, et aucune donnée n'est transmise à l'utilisateur, ainsi la station de base ne connaît pas les nœuds qui ont épuisé leur énergie. TEEN ne convient pas aux applications qui nécessitent des envois périodiques de données.

3.5.1.3 APTEEN (Adaptive Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)

Pour remédier aux limitations du protocole TEEN, des auteurs ont proposé une extension de TEEN appelée APTEEN [1]. APTEEN est un protocole hybride qui change la périodicité et les valeurs des seuils utilisés dans TEEN selon les besoins de l'utilisateur et le type d'application. Dans APTEEN, les cluster-heads

transmettent à leurs membres les paramètres suivants :

- l'ensemble des paramètres physiques par lesquels l'utilisateur est intéressé,
- les seuils : seuil Hard HT et seuil Soft ST,
- un ordonnancement TDMA permettant d'assigner à chaque nœud un slot de temps,
- un compteur de temps (CT) : c'est la période de temps maximum entre deux transmissions successives d'un nœud.

Dans APTEEN, les nœuds surveillent en continu l'environnement. Ainsi, les nœuds qui détectent une valeur d'un paramètre qui dépasse le seuil HT, transmettent leurs données. Une fois qu'un nœud détecte une valeur qui dépasse HT, il ne transmet les données au cluster head que si la valeur de ce paramètre change d'une quantité supérieure ou égale à ST. Si un nœud ne transmet pas de données pendant une période de temps CT, il devrait faire une capture de données et les retransmettre. APTEEN offre une grande flexibilité qui permet à l'utilisateur de choisir l'intervalle de temps CT, et les valeurs des seuils HT et ST pour que la consommation d'énergie soit contrôlée par la variation de ces paramètres. Cependant, APTEEN nécessite une complexité supplémentaire pour implémenter les fonctions de seuils et de périodes de temps CT. Ainsi, le surcoût et la complexité associés à la formation des clusters à plusieurs niveaux par TEEN et APTEEN sont assez élevés.

3.5.1.4 VGA (Virtual Grid Architecture routing)

Dans [5, 6], les auteurs ont proposé une approche de clustering pour maximiser la durée de vie dans les réseaux de capteurs dont les nœuds sont fixes ou mobiles avec une faible vitesse. Ils ont utilisé l'approche GPS-free [9] pour construire des clusters fixes, disjoints et homogènes en taille avec des formes symétriques. Dans [5, 6], la zone de déploiement des réseaux de capteurs est divisée pour former une topologie virtuelle rectiligne contenant des petites zones ayant la forme d'un carré, et dans chacune, un nœud est choisi comme cluster head. L'agrégation de données est réalisée à deux niveaux : local et global. L'agrégation locale est réalisée par l'ensemble des cluster heads appelés aussi Local Aggregators (LAs), alors que l'agrégation globale est réalisée par un sous ensemble de LAs appelés Master Aggregators (MAs). Cependant, la détermination de l'ensemble des MAs est un problème NP-difficile. Les heuristiques qui ont été proposées pour former l'ensemble des MAs à partir de l'ensemble des LAs, avaient comme objectif la maximisation de la durée de vie des réseaux de capteurs. Par exemple, dans l'heuristique CBAH (Cluster-

Based Aggregation Heuristic) [154] proposée par les mêmes auteurs, l'ensemble MAs est choisi selon la capacité des éléments de LAs. Les membres d'un même cluster surveillent le même phénomène, et leurs mesures sont corrélées par leur LA correspondant. Ce dernier à son tour transmet ces données corrélées à son MA correspondant.

3.5.1.5 CTLMN (Clustering Technique for Large multihop Mobile wireless Networks)

Lin et Chu [155] proposent une technique pour un large réseau Ad-hoc. La structure de cluster est contrôlée par la distance égale au nombre de sauts. Cette technique repose sur la manière dont les œuds sont regroupés dans un cluster en utilisant le nombre maximum de sauts R qui indique le rayon du cluster.

Chaque nœud contient les informations suivantes : l'ID de nœud, l'ID de son cluster, le nombre de sauts à partir de CH, l'ID du prochain nœud sur le chemin du cluster.

La maintenance du cluster se fait comme suit : lorsqu'un nœud se déplace au-delà de R , il quitte son cluster et peut rejoindre un autre cluster s'il se retrouve à une distance égale à R sauts du CH (du nouveau cluster). Si la distance entre deux CHs est inférieure ou égale à un nombre prédéfini de sauts D , le CH qui a le plus grand ID est écarté, et les nœuds dans le cluster écarté cherchent un autre cluster pour le rejoindre.

3.5.1.6 HEED (Hybrid, Eenergy-Efficient, Distributed approach)

Younes et Fahmy [156] ont proposé un algorithme de clustering distribué appelé HEED pour les réseaux de capteurs. Contrairement aux techniques précédentes, HEED ne pose aucune contrainte sur la distribution et la densité des nœuds. Il ne dépend pas de la topologie du réseau ni de sa taille mais il suppose que les capteurs ont la possibilité de modifier leur puissance de transmission. HEED sélectionne les cluster-heads selon un critère mixte regroupant l'énergie restante des nœuds et un second paramètre tel que le degré des nœuds. Il vise à réaliser une distribution uniforme des cluster heads dans le réseau et à générer des clusters équilibrés en taille. Un nœud n est élu comme cluster-head avec une probabilité P_{ch} égale à

$$P_{ch} = C_{prob} \frac{E_n}{E_{Total}} \quad (3.2)$$

où E_n est l'énergie restante du nœud n , E_{Total} est l'énergie globale dans le réseau et C_{prob} est le nombre optimal de clusters. Cependant, l'évaluation de E_{Total} présente une certaine difficulté, à cause de l'absence de toute commande centrale. Un autre problème réside dans la détermination du nombre optimal de clusters. De plus, HEED ne précise pas de protocole particulier à utiliser pour la communication entre les cluster-heads et le sink. À l'intérieur du cluster, le problème ne se pose pas car la communication entre les membres et le cluster-head est directe (à un saut). D'autre part, avec HEED, la topologie en clusters n'économise pas de l'énergie dans les communications intra-cluster et les clusters générés ne sont pas équilibrés en taille.

3.5.1.7 CSOS (Cluster-based Self-Organization algorithm for wireless Sensor networks)

Dans [157, 158, 159], les auteurs ont proposé une technique d'auto-organisation basée sur l'approche de clustering pour optimiser la consommation d'énergie dans ces réseaux. Cette technique consiste à regrouper les nœuds proches géographiquement en clusters. Elle implique des paramètres déterminants pour produire un nombre réduit de clusters homogènes en taille et en rayon, et que les clusters soient stables. Le poids de chaque capteur est calculé en fonction des paramètres suivants : la 2-densité, l'énergie restante et la mobilité. Le capteur ayant le plus grand poids dans son voisinage à 2 sauts devient cluster-head. En outre, la taille des clusters générés est comprise entre deux seuils qui représentent le nombre minimal et maximal de capteurs dans un cluster. Ces deux seuils sont choisis arbitrairement ou suivant la topologie du réseau. Dans un cluster, chaque capteur membre est au plus à deux sauts du cluster-head. Le processus d'élection des cluster-heads est périodique afin de distribuer équitablement la consommation d'énergie parmi les capteurs.

3.5.1.8 SAR (Sensor Aggregates Routing)

Fang et al. [160] ont proposé une approche de clustering pour l'agrégation des données dans les réseaux de capteurs surveillant plusieurs cibles. Ces cibles peuvent être stationnaires ou se déplaçant à n'importe quel moment et indépendamment des états des autres cibles. L'objectif de cet algorithme est de déterminer le nombre de cibles et les localisations approximatives des clusters associés aux cibles dans la zone d'intérêt. Puis, on surveille quand les cibles se déplacent, rejoignent ou quittent la zone d'intérêt. Au début, les nœuds examinent les caractéristiques spatiales

des signaux associés aux cibles quand plusieurs cibles sont à proximité les unes des autres. Puis, ils sont groupés en clusters selon la puissance du signal détecté de sorte qu'il y ait un seul pic par cluster. Un pic pourrait représenter une cible, plusieurs cibles proches ou aucune cible quand le pic serait produit par les atténuations du signal. Le processus d'élection des cluster-heads se fait dans un voisinage à un seul saut. Les nœuds ayant la plus grande portée de signal par rapport à ses voisins sur un saut se déclare cluster-head. Ainsi, le choix des cluster-heads (Sensor Aggregates) se fait selon l'allocation de ressources.

Dans [160], Fang et al. ont proposé trois algorithmes pour la désignation des nœuds qui agrègent les données (Node Aggregates) :

- DAM (Distributed Aggregate Management) est un algorithme distribué conçu pour surveiller une cible. Il comporte un prédicat de décision P pour chaque nœud afin qu'il décide s'il devrait participer à l'agrégation de données et un arrangement d'échange de message M concernant la façon d'appliquer le prédicat de groupement aux nœuds. Le but de DAM est d'élire les cluster-heads et maintenir les informations locales. Dans DAM, seuls les nœuds avec une puissance de signal dépassant un seuil fixé peuvent participer au processus d'élection du cluster-head.
- EBAM (Energy-Based Activity Monitoring) est une extension de DAM. Il fournit une solution pour déterminer le nombre de cibles dans un cluster. Il suppose que toutes les cibles ont la même puissance. Ainsi, lorsque la puissance d'une cible dans un cluster est connue, le nombre de cibles peut être déduit de la puissance totale du signal dans le cluster.
- EMLAM (Expectation-Maximization Like Activity Monitoring) enlève la supposition que chaque cible a la même puissance. EMLAM estime les positions des cibles et la puissance du signal à travers les signaux reçus et utilise les évaluations résultantes pour prévoir comment les signaux des cibles peuvent être fusionnés dans chaque capteur. Ce processus est réitéré, jusqu'à ce que l'évaluation soit suffisamment bonne.

3.5.2 Structure en chaîne

Les chaînes, structures dans lesquelles un nœud ne peut communiquer qu'avec deux nœuds voisins, sont le résultat de la recherche des schémas d'agrégation qui fournissent un équilibre de la consommation énergétique. Ce type de structure est utilisé conjointement avec les clusters, afin d'améliorer les délais de transmission.

3.5.2.1 PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

Dans [106], Lindsey et Raghavendra ont proposé une version améliorée de LEACH appelée PEGASIS. L'idée principale de PEGASIS est de former une chaîne entre les nœuds de sorte que chaque nœud reçoive de (et communique à) un voisin proche. Les données collectées sont transmises d'un nœud à un autre qui les agrège jusqu'à ce qu'elles arrivent à un nœud particulier qui les transmet à la station de base. Les nœuds qui transmettent les données à la station de base sont choisis tour à tour selon une politique round-robin dans le but de réduire l'énergie moyenne dépensée par les nœuds 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. Par ailleurs, PEGASIS suppose que les nœuds sont capables de modifier leur puissance de transmission.

Les résultats de simulation ont montré que PEGASIS peut prolonger de deux à trois fois la durée de vie d'un réseau de capteurs par rapport à LEACH. Cela en fonction du critère choisi pour évaluer la durée de vie d'un réseau, i.e. quand 1%, 20%, 50% ou 100% des nœuds épuisent leurs batteries. Un tel gain de performances est réalisé par l'élimination du surcoût causé par le processus de formation des clusters dans LEACH, et par la réduction du nombre de transmissions et de réceptions en agrégeant les données. Bien que le surcoût du "clustering" soit évité, PEGASIS exige toujours un ajustement dynamique de la topologie puisqu'un nœud devrait connaître le niveau d'énergie de ses voisins avant de relayer ses données. Cependant, un tel ajustement de la topologie pourrait causer un surcoût important. En outre, PEGASIS suppose que tout nœud communique directement avec la station de base qui gère la topologie d'une manière centralisée. Or, cette supposition est loin de la réalité car les capteurs communiquent généralement en mode multi-sauts pour atteindre la station de base. D'autre part, PEGASIS suppose que tous les nœuds maintiennent une table contenant les localisations de tous les autres nœuds dans le réseau. En résumé, PEGASIS est adapté seulement aux capteurs sans fil dont les nœuds sont fixes. Son évaluation dans des environnements mobiles pourrait dégrader considérablement ses performances.

Une variante de PEGASIS appelée Hierarchical PEGASIS [105] a été conçue afin d'améliorer PEGASIS. Dans Hierarchical PEGASIS, la chaîne est divisée en groupes de sorte que chaque nœud communique avec un seul nœud voisin de niveau plus bas de la hiérarchie. Les transmissions parallèles dans des groupes différents minimisent le délai de transmission. Un autre protocole similaire à PEGASIS,

appelé C^2E^2S , a été proposé dans [101]. Il est basé sur les clusters et les chaînes. C'est un protocole centralisé où la station de base organise le réseau en se basant sur l'énergie résiduelle des nœuds.

3.5.2.2 Placide

Dans [165], Kacimi présente une solution protocolaire nommé “Placide” pour des réseaux de capteurs de petite taille destinés au suivi de la chaîne du froid durant la phase de transport. La solution “Placide” consiste à organiser les communications sous forme de liste doublement chaînée dans une architecture sans station de base. Pour cela, un protocole d'initialisation permet de synchroniser les nœuds et de construire une chaîne. Ensuite, un autre protocole du régime permanent consiste à conserver le synchronisme entre les capteurs pour qu'ils se réveillent les uns après les autres afin de transférer leurs alarmes de température et confirmer leur présence dans le cycle.

3.5.3 Structure en zone

Les zones définissent généralement un sous-ensemble de nœuds capteurs sans contrôleur central. La forme particulière présente dans la littérature est la grille, zone bien identifiée par des surfaces carrées de taille donnée. Un exemple de cette approche est TTDD.

3.5.3.1 TTDD (Two-Tier Data Dissemination)

Dans TTDD [161], chaque nœud source crée une grille virtuelle du réseau. Cette grille est par la suite utilisée par le protocole de routage pour acheminer les requêtes et les données entre la source et le “sink”.

Dans TTDD, un système de localisation (tel le GPS) est utilisé pour que les nœuds homogènes sachent leur position fixe. Une fois un événement est détecté dans le réseau, les nœuds qui l'entourent traitent le signal de cet événement et un de ces nœuds devient la source et génère un rapport de données. Ce nœud source crée virtuellement la grille du réseau afin de préciser les nœuds de dissémination responsables de router les données vers le “sink”.

TABLE 3.1 – Bilan des solutions hiérarchiques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs

	Type de hiérarchie	Information exigée sur le réseau	Contrôle de puissance	Nombre prédéfini de clusters/zones/chaîne
LEACH	Cluster	Energie des nœuds	OUI	NON
PEGASIS	chaîne	Energie des nœuds	OUI	NON
Hierarchical PEGASIS	Chaîne + Cluster	Energie des nœuds	OUI	NON
C^2E^2S	Cluster	Chaîne + Energie des nœuds	OUI	NON
TEEN	Cluster	Position des nœuds	NON	NON
APTEEN	Cluster	Position des nœuds	NON	NON
VGA	Cluster	Position des nœuds	NON	NON
CTMN	Cluster	Position des nœuds	NON	NON
HEED	Cluster	Energie des nœuds	OUI	NON
CSOS	Cluster	Position des nœuds	OUI	NON
SAR	Cluster	Etat des liens	NON	NON
TTDD	Zone	Position des nœuds	NON	NON
Placide	chaîne	Nbre de nœuds	NON	NON

3.6 Techniques basées sur la mobilité de collecteur

Dans certains cas où les nœuds sont mobiles, la mobilité peut être utilisée comme outil pour réduire la consommation d'énergie (au-delà du duty-cycling et des techniques orientées données). Dans un réseau de capteurs statiques, les paquets provenant des nœuds suivent des chemins multi-sauts vers la station de base. Ainsi, certains chemins peuvent être chargés (sollicités plus que d'autres) et les nœuds proches de la Station de Base relayent plus de paquets [162] et sont plus sujets à

l'épuisement prématuré de leur batterie [163]. Si certains nœuds (éventuellement, la station de base) sont mobiles, le trafic peut être modifié si les nœuds mobiles sont chargés de collecter des données directement à partir de nœuds statiques.

Les nœuds ordinaires attendent le passage d'un dispositif mobile pour lui envoyer leurs messages de telle sorte que la communication ait lieu à proximité (directement ou au plus avec un nombre limité de sauts). Par conséquent, les nœuds ordinaires peuvent économiser de l'énergie parce que la longueur du chemin, la contention et les overheads de diffusion sont ainsi réduits. En outre, le dispositif mobile peut visiter le réseau afin de répartir uniformément la consommation d'énergie due à la communication. Lorsque le coût de la mobilité des nœuds de capteurs est prohibitif, l'approche classique consiste à attacher un capteur à des entités qui sont en itinérance dans le champ de détection, comme des autobus ou des animaux.

Les stratégies reposant sur la mobilité peuvent être classées en deux ensembles : les stratégies avec un Sink mobile et les stratégies avec des relais mobiles, selon le type de l'entité mobile. Il est important de souligner ici que, lorsque nous examinons des systèmes mobiles, un problème important est le type de contrôle de la mobilité des nœuds qu'intègre la conception du réseau, cet aspect est étudié dans [164]. Les nœuds mobiles peuvent être divisés en deux catégories : ils peuvent être spécifiquement conçus comme partie de l'infrastructure du réseau, ou faire partie de l'environnement. Quand ils font partie de l'infrastructure, leur mobilité peut être entièrement contrôlée dans la mesure où ils sont, généralement, robotisés. Lorsque les nœuds mobiles font partie de l'environnement, ils pourraient ne pas être contrôlables. S'ils suivent un horaire strict, ils ont une mobilité complètement prévisible (par exemple, une navette pour les transports publics [11]). Sinon, ils peuvent avoir un comportement aléatoire de sorte qu'aucune hypothèse ne puisse être faite sur leur mobilité.

Enfin, ils peuvent suivre un schéma de mobilité, qui n'est ni prévisible, ni totalement aléatoire. Par exemple, c'est le cas d'un bus se déplaçant dans une ville, dont la vitesse est soumise à d'importantes variations en raison des conditions de circulation. Dans un tel cas, les schémas de mobilité peuvent être déduits en se fondant sur des observations et des estimations d'une certaine précision.

3.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les principales approches d'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Le premier axe des techniques de conservation

d'énergie vise à réduire le duty-cycle des nœuds. Cela se traduit par la réduction de la durée de l'activité radio afin d'éviter toute surconsommation d'énergie due à la communication. Dans cette optique, plusieurs méthodes ont vu le jour soit sous forme de protocoles MAC à faible duty-cycle ou bien sous forme de protocoles indépendants de niveau supérieur fondés sur des ordonnancements sleep/wakeup.

Le second axe s'intéresse à l'acquisition des données. En effet, un point intéressant est que plusieurs solutions protocolaires proposées dans la littérature supposent que la consommation d'énergie de la radio est plus élevée que celle due à l'échantillonnage ou au traitement de données. En revanche, de nombreuses applications réelles ont montré que la consommation d'énergie du détecteur est comparable, voire supérieure à la consommation nécessaire à la radio. En outre, l'échantillonnage peut requérir beaucoup de temps (comparé à la durée nécessaire pour les communications) ce qui se traduit par une consommation d'énergie très élevée. Certains travaux de recherche laissent à penser que la conservation d'énergie centrée sur l'acquisition de données n'a pas encore été pleinement analysée. Cela ouvre la voie au développement de techniques pour réduire la consommation d'énergie des capteurs.

Dans le troisième axe, nous avons décrit des solutions hiérarchiques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Ces travaux nous ont permis l'identification de trois structures principales d'organisation : les zones, les clusters et les chaînes. Lorsque le réseau est plus étendu, la gestion devient plus difficile lorsqu'un protocole non hiérarchique est utilisé pour la gestion des communications. Chaque nœud doit stocker plus d'informations concernant le réseau et ses voisins. Les exigences en taille des réseaux de capteurs, dues aux déploiements généralement étendus, rendent le stockage des informations de topologie très coûteux par rapport aux ressources disponibles dans ces dispositifs. De même, le surcoût de communication entre les nœuds devient plus important dû aux échanges de signalisation.

Dans le dernier axe, nous avons évoqué les méthodes centrées sur la mobilité des nœuds relais ou bien des puits de données. Il existe un intérêt croissant pour ce type d'approches, car si certaines applications pratiques envisagent des déploiements moins denses, alors pour des raisons d'efficacité et de robustesse, les protocoles de communication peuvent exploiter de façon appropriée la mobilité des nœuds collecteurs.

Il existe bien évidemment beaucoup d'autres techniques de conservation d'énergie. Par exemple, les paradigmes émanant de l'auto-organisation des systèmes, les mécanismes cross-layers et d'autres protocoles indépendants de niveau réseau ou

de niveau application.

La prochaine phase de notre travail consiste justement à présenter une solution adressant l'économie d'énergie par la prise en charge de la redondance de mesure dans les RCSF denses. Dans notre solution, nous allons jumeler de nombreux mécanismes que nous avons cité dans l'état de l'art.

Chapitre 4

Solution pour la conservation d'énergie fondée sur la redondance de mesure

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons MR-LEACH (*Measurement Redundancy aware LEACH*), une technique de regroupement de nœuds redondants dans les réseaux de capteurs hiérarchiques. Cette technique prend en compte la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs. Notre approche s'appuie sur un schéma hiérarchique à trois niveaux comme dans LEACH [171]. MR-LEACH introduit la notion de proximité géographique pour mieux exploiter la redondance. Cette technique améliore considérablement la consommation d'énergie et garantit un meilleur délai de bout en bout.

4.2 Redondance dans les réseaux de capteurs

Le déploiement aléatoire des réseaux de capteurs peut induire une grande redondance entre les nœuds. Cette redondance représente pour les réseaux de capteurs une caractéristique qui est à la fois rentable et pénalisante. Elle peut être utilisée pour améliorer la fiabilité de la détection ou l'exactitude des données collectées. Par contre, elle engendre un transfert de données plus important et implique une charge de trafic supplémentaire. Ce constat nous motive à renforcer ses aspects positifs.

Le concept de la redondance n'est pas formellement défini sous tous ses aspects dans les réseaux de capteurs. De plus, cette propriété peut être définie de différentes

façons, toutefois nous avons retenu la définition suivante qui nous semble être la plus appropriée pour le contexte des réseaux de capteurs. Définition : la redondance est l'ajout de ressources supplémentaires qui peuvent produire des résultats similaires [24]. La redondance signifie donc la possibilité d'obtenir l'information d'une position spécifique à partir de différentes sources et elle se base sur le positionnement géographique des nœuds capteurs dans la zone d'intérêt. Elle implique la réplication des ressources dans la surface de couverture du réseau.

Les réseaux de capteurs sont denses et redondants. En effet, bien que les nœuds capteurs puissent être placés un à un de manière déterministe par un humain ou par un robot, le déploiement aléatoire est adopté dans la majorité des scénarios pour des raisons pratiques telles que le coût et le temps.

4.3 Problématiques liées à la redondance de mesure

La plupart des travaux proposent des améliorations en ce qui concerne la consommation d'énergie sans tenir compte de la redondance de mesure qui est également une source de consommation inutile d'énergie. La description du placement initial peut expliciter une certaine redondance dans les capteurs déployés. Les réseaux de capteurs sont caractérisés par un nombre important de nœuds. La redondance de mesure peut découler de cette forte densité de nœuds. Plusieurs nœuds peuvent détecter un même événement et donc reporter la même valeur de mesure. Il faut donc prévoir des mécanismes pour la prise en charge d'éventuelles redondances de mesure. La problématique est donc ici la prise en compte de la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs pour une meilleure amélioration de la consommation d'énergie. Cela consiste à réduire le reporting de valeurs redondantes. Ce qui mène à la diminution du nombre de transmissions.

P1 : Gestion des transmissions inutiles

Pour prolonger la durée de vie d'un réseau de capteurs, il faut prévoir une stratégie évitant les transmissions inutiles. Ces dernières sont une source de surconsommation d'énergie.

P2 : Gestion d'un grand volume de données

La plupart des réseaux de capteurs hiérarchiques agrègent les données au niveau des nœuds intermédiaires ou des Cluster-Heads. Par ailleurs, les nœuds capteurs sont limités en termes d'espace de stockage. Il faut donc prévoir une stratégie évitant la transmission des données redondantes.

P3 : Gestion des interférences

L'interférence affecte fortement la performance du système dans le contexte des réseaux ad hoc et des réseaux de capteurs.

Dans un réseau sans fil composé d'un grand nombre de nœuds répartis dans l'espace, la communication est limitée par différents effets comme la propagation sans fil, les interférences et le bruit thermique. Les effets introduits par la propagation dans le canal sans fil comprennent l'atténuation des signaux émis en fonction de la distance (path loss), le blocage des signaux provoqués par de gros obstacles (shadowing), et la réception de plusieurs copies du même signal transmis (multipath fading).

L'interférence du réseau vient de l'accumulation de signaux émis par d'autres nœuds qui détériore la réception de la source souhaitée. Le bruit thermique est introduit par l'électronique du récepteur et est généralement modélisé par un bruit blanc gaussien additif.

Ce chapitre propose et analyse une technique pour la prise en compte de la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs hiérarchiques.

4.4 Technique de regroupement par proximité géographique

Les architectures en clusters sont largement utilisées dans les RCSF pour leur capacité de passage à l'échelle. Cette structuration doit permettre une utilisation plus efficace des ressources rares du réseau telles que l'énergie et la bande passante.

MR-LEACH est utile uniquement dans le cas de mesures périodiques. Cette technique permet de regrouper les nœuds feuilles qui, en fonction de leur position géographique, captent la même valeur de mesure. Ainsi, les communications intra-clusters sont réduites et la consommation d'énergie est optimisée.

4.4.1 Hypothèses

Pour faciliter la compréhension de notre approche dans le reste de ce chapitre, nous faisons quelques hypothèses raisonnables :

- Tel LEACH, MR-LEACH s'appuie sur une architecture réseau à trois niveaux (nœuds feuilles, cluster-heads, puits de données).
- Les nœuds sont aléatoirement et densément déployés.
- Les nœuds observent le même phénomène physique et génèrent un trafic périodique.
- Aucune information sur une éventuelle redondance n'est explicitement fournie.

4.4.2 Principe de l'approche

Les contraintes imposées par les capteurs rendent la conception d'une technique efficace pour le prolongement de la durée de vie dans les réseaux de capteurs comme un vrai défi. Pour traiter ce défi, nous avons proposé une technique de regroupement basée sur la redondance de mesure pour optimiser la consommation de l'énergie dans ces réseaux. Cette technique consiste à regrouper les nœuds proches géographiquement en groupes redondants. MR-LEACH combine donc la proximité géographique des nœuds et la redondance de mesure pour réduire le nombre de transmissions intra-clusters.

L'initialisation du protocole MR-LEACH comprend deux principales étapes.

- La première étape correspond à la collecte de données dans les clusters. En effet, après le déploiement des nœuds et la formation des clusters, chaque CH collecte les données des nœuds. Cette phase est dimensionnée par la durée *IntMeasure*.
- Dans la deuxième étape, les CHs déterminent la redondance de mesure et regroupent les nœuds redondants. Après un temps suffisant d'observation (*IntMeasure*), les CHs analysent les mesures collectées puis en se basant sur la proximité géographique des nœuds, ils déterminent les groupes de nœuds redondants.

Après l'identification des groupes redondants, un seul nœuds représentant par groupe est désigné pour transmettre et les autres nœuds arrêtent leurs transmissions. Tel que c'est illustré par la figure 4.1, à la fin de la phase d'initialisation, MR-LEACH fonctionne par super-trames périodiques. Les super-trames sont divisées en un ensemble de slots de temps qui sont alloués aux nœuds représentants pour envoyer leurs données au CH. Les autres slots sont assignés aux CHs pour envoyer les données à la station de base. Après chaque super-trame, le rôle du nœud

représentant tourne entre les nœuds du groupe. L'ensemble des super-trames forme un round et MR-LEACH assure que dans chaque round tous les nœuds envoient leurs données au moins une fois.

Il y a une proximité géographique entre deux nœuds si la distance qui les sépare est inférieure à un seuil donné d . Cette proximité se déduit directement de la distance euclidienne entre les nœuds. On note x_i et y_i les coordonnées du $i^{\text{ème}}$ nœud, et on imagine que chaque nœud est un point $N_i = (x_i, y_i)$ de l'espace. La distance euclidienne entre deux nœuds N_i et N_j est par définition :

$$d_2(N_i, N_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4.1)$$

Pour qu'il y ait proximité géographique entre un ensemble de nœuds capteurs, il faut que :

$$d_2(N_i, N_j) \leq d + \varepsilon \quad (4.2)$$

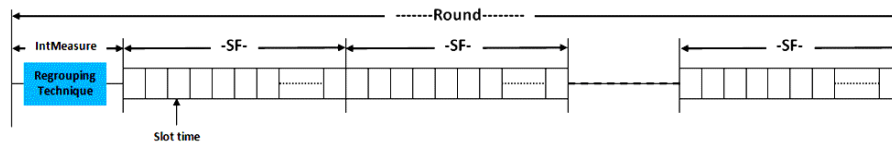


FIGURE 4.1 – Représentation du round de la solution

La proximité géographique est seulement vérifiée entre les nœuds capteurs qui reportent la même mesure durant l'intervalle de temps *IntMeasure*. Elle est donc vérifiée entre les capteurs qui sont susceptibles d'être redondants.

Durant la phase d'observation des mesures (*IntMeasure*), chaque CH crée une table de valeurs (*ValTable*) où il va stocker la valeur reportée par chacun de ses capteurs membres. Cette table servira, par la suite, pour calculer la matrice de redondance (*reGroup*) comme détaillé dans l'algorithme 1. Chaque CH va ensuite vérifier la proximité géographique de tous les groupes de nœuds capteurs ayant reporté la même valeur de mesure (avec une certaine précision α) durant *IntMeasure*. Chaque CH va ensuite placer dans une même colonne de la matrice *reGroup* les identifiants de tous nœuds capteurs qui sont dans une même proximité. Après ce regroupement de proximité géographique, le CH demande à certains nœuds capteurs de s'endormir pendant la prochaine super-trame de telle sorte qu'un seul nœud par groupe transmettra à la fois durant la prochaine super-trame.

Ce processus est répété jusqu'à la fin du round qui correspond à la durée de vie des clusters comme montré dans la figure 4.1. Il y aura à nouveau la formation des clusters ainsi que l'application de la technique de regroupement par proximité géographique.

4.4.3 Algorithme de regroupement de nœuds

Le processus de regroupement consiste à identifier les nœuds redondants. C'est-à-dire repérer les nœuds proches qui détectent les mêmes valeurs physiques à tout instant. De ce fait, il donne au réseau une organisation hiérarchique particulière. Dans cet algorithme, chaque CH cherche à identifier les nœuds feuilles redondants dans son cluster. Pour cela, le CH compare les valeurs de données collectées par ses nœuds feuilles durant la phase d'observation. Cette comparaison est effectuée entre les données des nœuds proches géographiquement. Il dresse, par la suite, un tableau de groupes redondants comme détaillé dans l'algorithme 1.

4.4.4 Exemple de scénario

Nous cherchons à réaliser le regroupement des capteurs redondants afin de maximiser la durée de vie du réseau, i.e. la durée restante avant l'épuisement en énergie d'un capteur du réseau. Il existe d'autres critères afin d'évaluer un algorithme de regroupement comme la minimisation du nombre de groupes ou l'équilibrage de la charge entre les groupes et donc de la taille des groupes.

Afin d'illustrer la technique de regroupement proposée, nous considérons une topologie arbitraire composée de 3 clusters dont les nœuds sont déployés aléatoirement (figure 4.2) :

Algorithme 1 Procédure de calcul du regroupement

nbNodes représente le nombre de nœuds ;
reGroup[][] représente le regroupement obtenu ;
nbSentMeasures représente le nombre de messages transmis par chaque nœud durant la phase d'observation ;
valTable[][] représente les valeurs de messages transmis ;
idNode_x représente l'identifiant du nœud *x* ;

Require: *nbNodes*, *nbSentMeasures*

Ensure: *reGroup*[][]

```

if (isClusterHead) then
  for (j ← 0 ; j < nbSentMeasures ; j++) do
    for (i ← 0 ; i < nbNodes ; i++) do
      valTable[j][i] ← valueij ;
    end for
  end for
  {groups calculation}
  for (j ← 0 ; j < nbSentMeasures ; j++) do
    f ← 0 ;
    x ← 0 ;
    for (i ← 0 ; i < nbNodes ; i++) do
      value ← valTable[j][i] ;
      while (x ≠ nbNodes) do
        if (valTable[j][x] = value ± α and ( $d_2(N_i, N_j) \leq d + \epsilon$ )) then
          reGroup[f][i] ← idNodex ;
          f ← f + 1 ;
          x ← x + 1 ;
        end if
      end while
    end for
  end for
end if
Return reGroup[][]
  
```

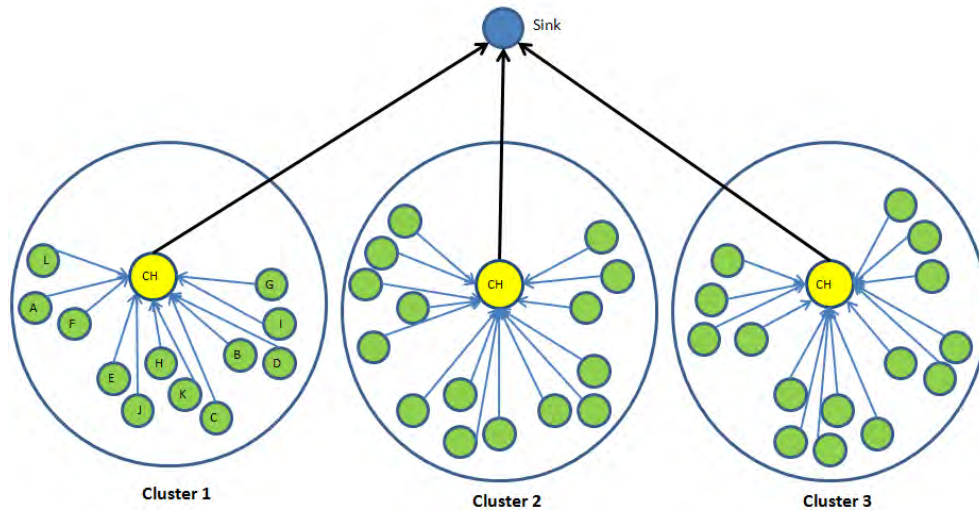


FIGURE 4.2 – Topologie initiale

Dans cet exemple, nous dérouleront l'algorithme de regroupement sur le cluster 1. C'est la même procédure sur les autres clusters.

Durant la phase d'observation, le CH place dans un tableau (Tableau 4.1) les valeurs des données collectées par ses nœuds feuilles. Par la suite, il compare ses valeurs en fonction de la proximité géographique des nœuds. Cette comparaison permettra au CH de déterminer les groupes de nœuds redondants (figure 4.3).

TABLE 4.1 – Valeurs de données durant la phase d'observation

nœud	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4
A	11	11.1	11	11.2
B	12.8	12.9	12.8	12.9
C	12.1	12	12	12.1
D	12.9	12.8	13	12.9
E	12	11.9	12	12
F	11.2	11.1	11	11.2
G	13	13	13.1	12.9
H	12.1	12	11.9	12
I	12.9	12.9	13	13
J	12	11.9	11.8	12
K	11.9	12	12	12.1
L	11	10.9	11	11.1

A partir de ce tableau de valeurs de données, le CH génère un tableau de groupes redondants qui regroupe dans une même colonne les nœuds du même groupe (Tableau 4.2). Ces groupes ont été formés sur la base de la proximité géographique

des nœuds et de la comparaison des valeurs de données collectées.

TABLE 4.2 – Groupes redondants du cluster 1

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
A	C	B
F	E	D
L	H	G
	J	I
	K	

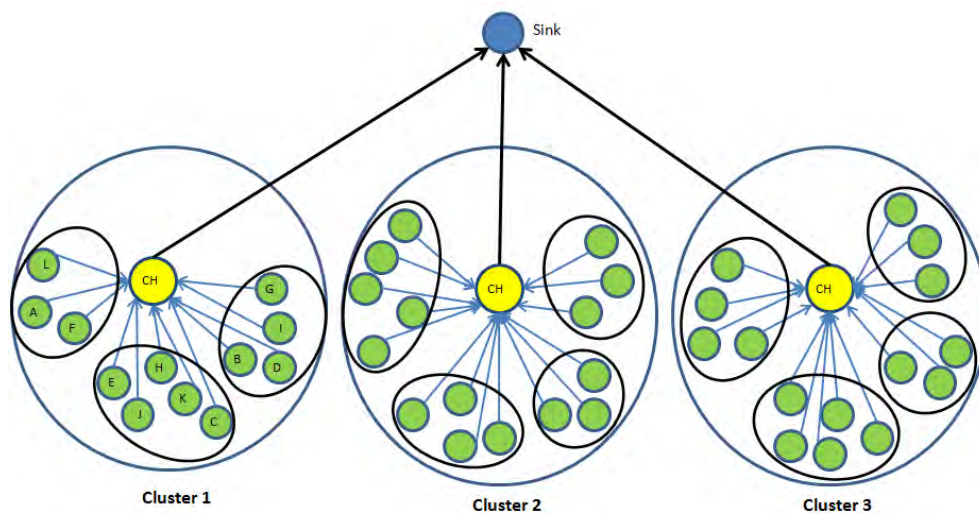


FIGURE 4.3 – Réseau de capteurs après regroupement par proximité géographique et analyse des mesures relevées

Cet algorithme permet la constitution de groupes de capteurs redondants, chacun étant représentant de son groupe pour une durée donnée. Ce regroupement s'impose naturellement afin de limiter la consommation d'énergie des capteurs : les capteurs du même groupe transmettent, à tour de rôle, leurs informations et celles-ci sont relayées par le CH vers le "sink". Le nombre de messages envoyés est ainsi réduit.

4.4.5 Contexte d'exécution de notre contribution

Le principal objectif de notre contribution est de proposer un algorithme générique pour l'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs hiérarchiques. Pour que cet algorithme soit efficace, il fallait qu'il prenne en considération les spécificités des réseaux de capteurs et qu'il soit réalisable dans des condi-

tions qui se rapprochent de la réalité. En effet, quelques facteurs ont été pris en compte à savoir :

- La distribution aléatoire des capteurs dans la zone d'intérêt,
- Les nœuds détectent les mêmes phénomènes physiques,

De plus, certains paramètres sont considérés fondamentaux pour mettre en œuvre cet algorithme. Ces paramètres concernent :

- La position des capteurs : la position d'un capteur peut être calculée à l'aide d'un GPS. En revanche, l'utilisation d'un GPS pour les capteurs consomme de l'énergie. Cependant, la topologie statique des réseaux de capteurs considérés n'exige pas une mise à jour périodique des positions des capteurs.
- La connectivité : c'est un facteur déterminant dans les réseaux ad hoc et de capteurs. Elle permet d'assurer que tout nœud destinataire est joignable par tout nœud source du réseau. En particulier, dans les réseaux de capteurs, il devrait exister au moins un chemin entre tout capteur et la station de base pour garantir l'acheminement de l'information en tout moment et que tous les nœuds soient joignables à partir de la station de base (réseau connexe).
- La couverture de la zone d'intérêt : c'est un élément important pour les réseaux de capteurs. Tout algorithme conçu pour les réseaux de capteurs devrait assurer que l'occurrence d'un événement dans la zone de déploiement des capteurs pourrait être détectée par au moins un capteur.

4.5 Évaluation de performance

Nous présentons dans cette section, les performances de MR-LEACH et l'environnement d'exécution des simulations.

4.5.1 Environnement de simulation

Nous avons réalisé plusieurs simulations pour évaluer les performances de MR-LEACH en termes de consommation d'énergie et de délai de bout en bout. Puis, nous avons comparé ces résultats à ceux du protocole LEACH en termes de durée de vie du réseau et de délai de bout en bout. Pour cela, nous avons exploité le simulateur NS-2 [167] pour implémenter l'algorithme proposé.

Tout d'abord, nous avons intégré l'implémentation de LEACH. Ensuite, pour développer notre technique de regroupement par proximité géographique, nous avons modifié LEACH selon la structure hiérarchique dans les commandes d'as-

sociation de la couche MAC ainsi que la méthode de remplissage de la table de redondance au niveau de la couche physique.

Nous avons comparé notre solution avec LEACH. Pour cela, nous avons effectué des simulations avec les mêmes paramètres et métriques pour les deux approches. Nous nous sommes intéressés essentiellement à la consommation d'énergie des nœuds puisqu'elle constitue un critère primordial pour la détermination de la durée de vie du réseau. Nous avons évalué le délai de bout en bout puisqu'il constitue également un critère de performance pour beaucoup d'applications de monitoring dans les RCSF.

Les métriques de performance dans notre étude sont les suivantes :

1. Consommation d'énergie : Pour évaluer la consommation d'énergie, nous avons récupéré les niveaux d'énergie au lancement de la simulation et les niveaux d'énergie courants des nœuds à partir des fichiers traces générés par les simulations.
2. Délai de bout en bout : Pour évaluer le délai de bout en bout, nous avons récupéré le temps d'émission et de réception de chaque paquet à partir des fichiers traces générés.
3. La durée de vie : Pour évaluer la durée de vie du réseau, nous avons récupéré le temps après lequel le niveau d'énergie des nœuds est nul. Les niveaux d'énergie sont récupérés après chaque round. Nous avons tracé le nombre de nœuds "toujours en vie" au fil du temps de la simulation.

4.5.2 Paramètres de simulation

Afin d'évaluer les performances de MR-LEACH, nous avons réalisé principalement deux scénarios.

4.5.2.1 scénario 1

Dans ce premier scénario de simulation, les réseaux sont déployés sur une aire d'une taille de $250 * 250 m^2$. Le nombre maximal de nœuds est 1000. Les coordonnées de la station de base sont (135, 155). Les nœuds connaissent leur position et peuvent la communiquer à leur CH respectif. Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau 4.3.

TABLE 4.3 – Paramètres de simulation

Surface de simulation	250 * 250 m^2
Nombre de nœuds	[100, 1000]
Taille de paquet	55 bytes
Energie initiale des nœuds	2 j
Débit de transmission	250 kbs^{-1}
Rayon de détection (R)	30 m
Puissance de transmission	24.75 mW
Puissance de réception	13.5 mW
Puissance à vide “Idle power”	6.5 mW
Puissance à l’état sommeil “Sleep power”	15 μW

Dans ce scénario, pour comparer les performances de MR-LEACH à celles du protocole LEACH, nous avons réalisé les simulations dans des contextes d’exécution différents. Ainsi, afin d’analyser la robustesse de MR-LEACH face au nombre de nœuds, nous avons choisi d’évaluer les métriques suivantes et les comparer à celles de LEACH :

- La consommation moyenne d’énergie des CHs en fonction du nombre de nœuds,
- La consommation moyenne d’énergie de chaque nœud en fonction du nombre de nœuds,
- La durée de vie moyenne du réseau (avec 1000 nœuds),
- Le délai de bout en bout en fonction du nombre de nœuds,

Les résultats obtenus pour ces métriques sont présentés dans les figures 4.4, 4.5, 4.6 et 4.7 (avec 5% des nœuds élus en tant que CHs).

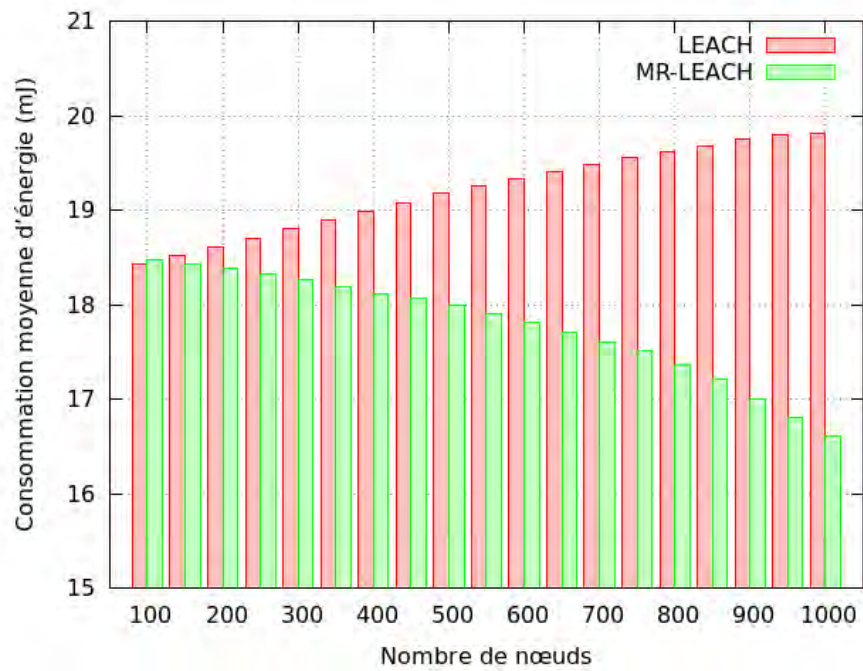


FIGURE 4.4 – Consommation moyenne d'énergie de chaque CH durant un round

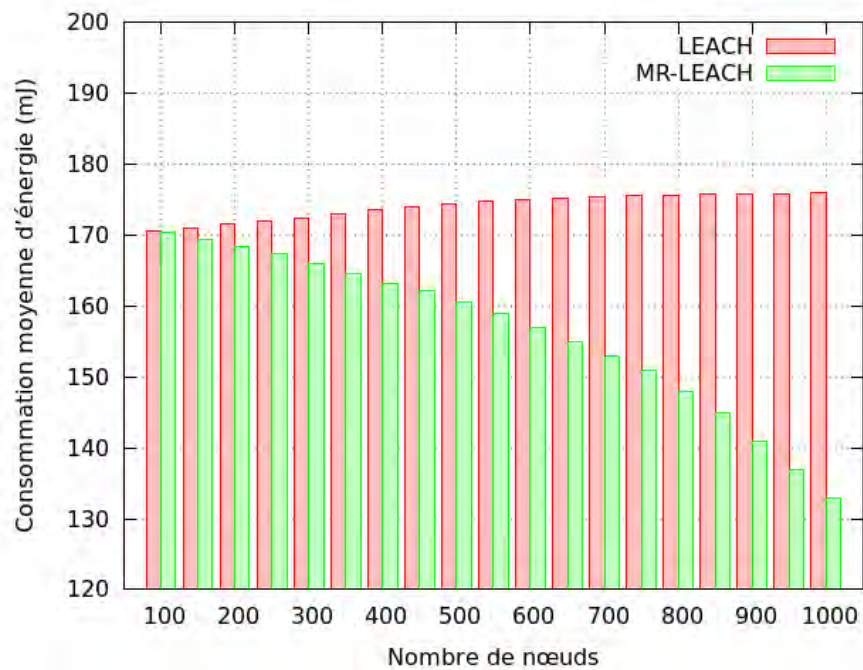


FIGURE 4.5 – Consommation moyenne d'énergie de chaque nœud après 20 rounds

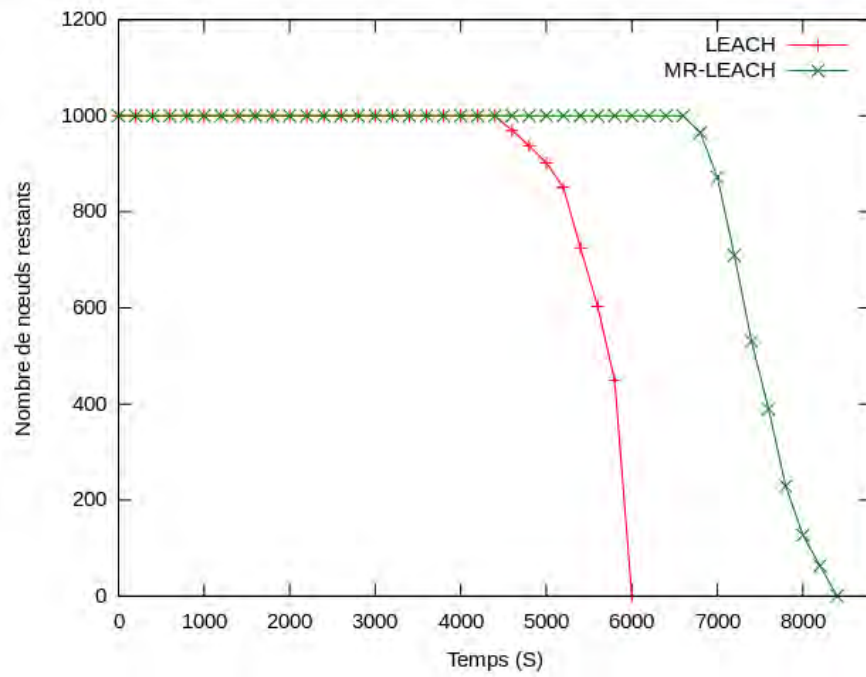


FIGURE 4.6 – Durée de vie moyenne du réseau

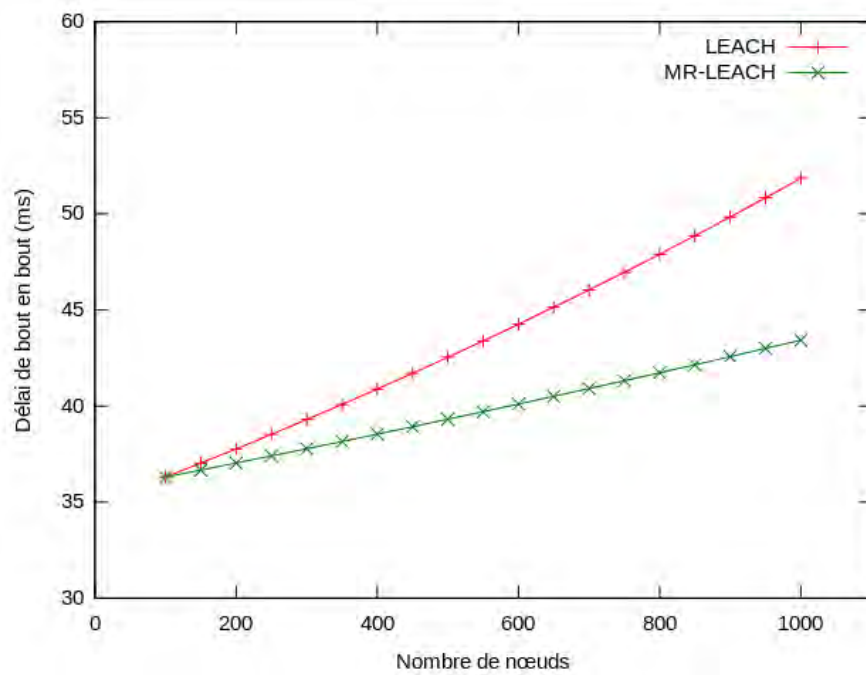


FIGURE 4.7 – Délai de bout en bout

4.5.2.2 scénario 2

Dans ce second scénario, nous montrons l'évolution des métriques en fonction du rayon de détection. Les réseaux simulés sont de taille $250 * 250 \text{ m}^2$. Le nombre de nœuds est 1000. Les coordonnées de la station de base sont (135, 155). Le rayon de détection des capteurs prend les valeurs suivantes : [20, 30, 40, 50, 60, 70]. Les nœuds connaissent leur position et peuvent la communiquer à leur CH respectif. Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau 4.4.

TABLE 4.4 – Paramètres de simulation

Surface de simulation	$250 * 250 \text{ m}^2$
Nombre de nœuds	1000
Taille de paquet	55 bytes
Energie initiale des nœuds	2 j
Débit de transmission	250 kbs^{-1}
Rayon de détection (R)	[20, 30, 40, 50, 60, 70] m
Puissance de transmission	24.75 mW
Puissance de réception	13.5 mW
Puissance à vide "Idle power"	6.5 mW
Puissance à l'état sommeil "Sleep power"	15 μW

Dans ce scénario, pour comparer les performances de MR-LEACH à celle du protocole LEACH, nous avons réalisé des simulations en faisant varier le rayon de détection. Ainsi, afin d'analyser la robustesse de MR-LEACH face au rayon de détection, nous avons choisi d'évaluer les métriques suivantes et les comparer à LEACH :

- La consommation moyenne d'énergie des CH en fonction du rayon de détection,
- La consommation moyenne d'énergie de chaque nœud en fonction du rayon de détection,
- La durée de vie moyenne du réseau en fonction du rayon de détection,
- Le délai de bout en bout en fonction du rayon de détection,

Les résultats obtenus pour ces métriques sont présentés dans les figures 4.8, 4.9, 4.10 et 4.11 (avec 5% des nœuds élus en tant que CHs).

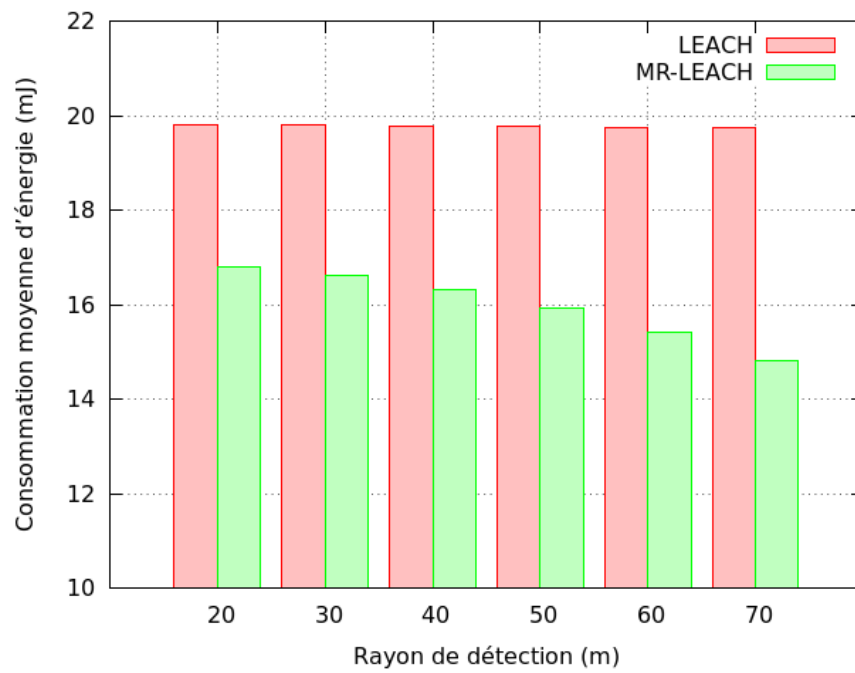


FIGURE 4.8 – Consommation moyenne d'énergie de chaque CH durant un round

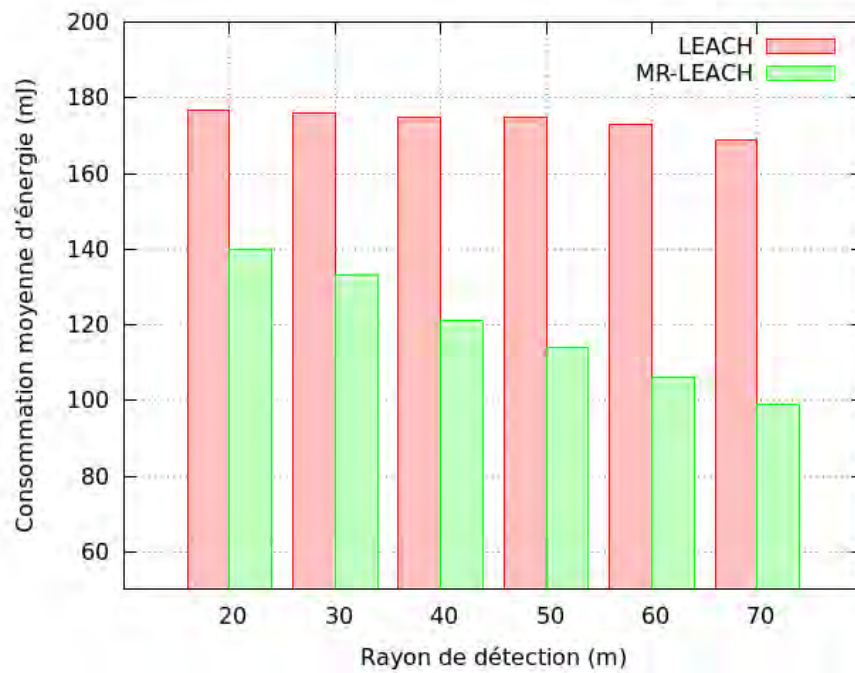


FIGURE 4.9 – Consommation moyenne d'énergie de chaque nœud après 20 rounds

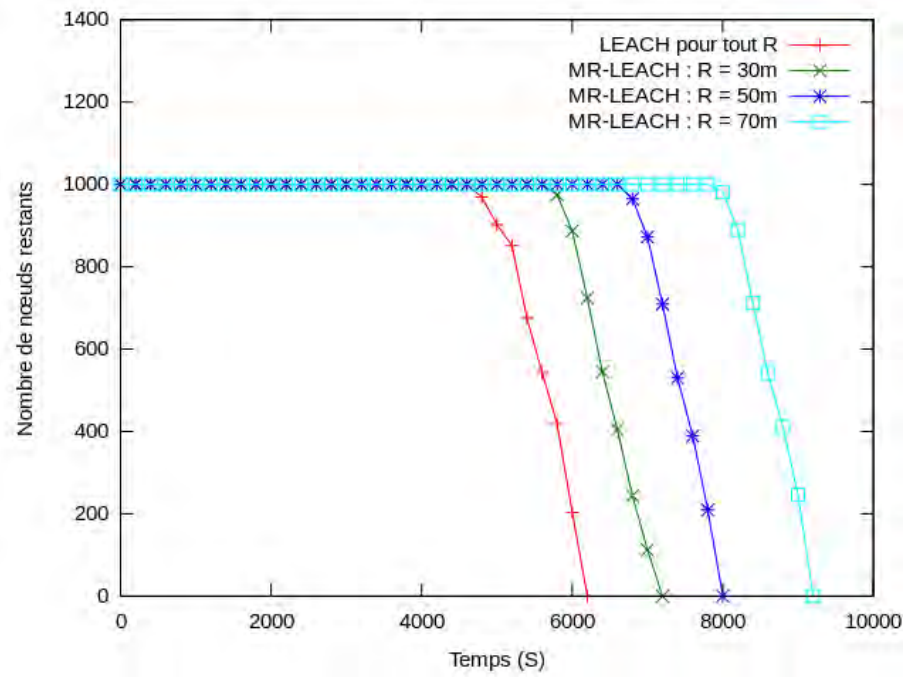


FIGURE 4.10 – Durée de vie moyenne du réseau

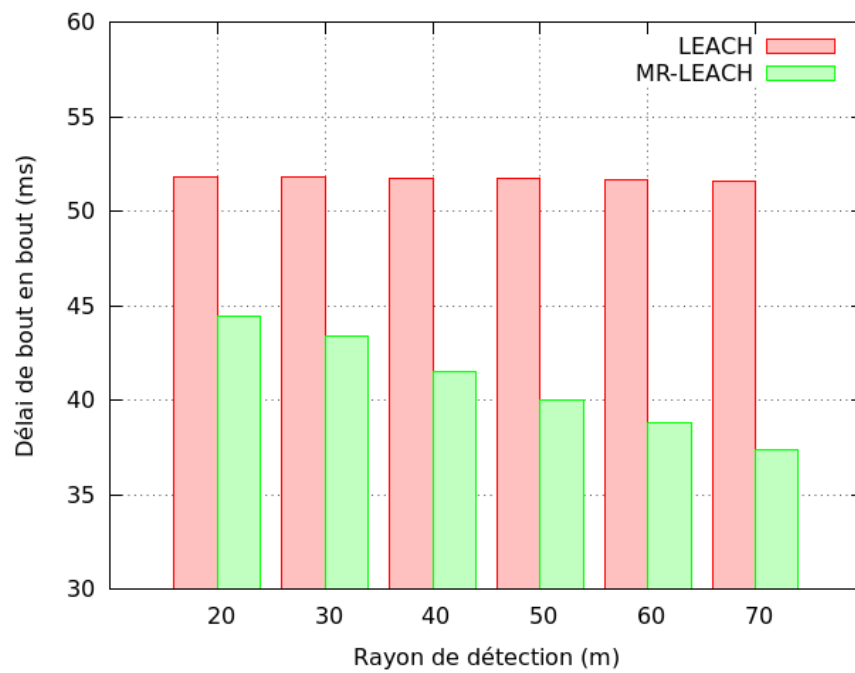


FIGURE 4.11 – Délai de bout en bout

4.6 Discussions

4.6.1 Consommation moyenne d'énergie des CHs

Comme l'illustre la figure 4.4, nous remarquons que dans MR-LEACH la consommation d'énergie des CHs diminue quand le nombre de nœuds augmente contrairement à LEACH. En effet, plus la densité du réseau augmente, plus la redondance de mesure augmente et moins les CHs reçoivent des données. Avec une forte densité, le nombre groupes diminue dans les clusters. Ainsi, le nombre de communications diminue dans les clusters.

Dans la figure 4.8, nous remarquons que dans MR-LEACH la consommation d'énergie des CHs diminue quand le rayon de détection augmente. En effet, plus le rayon de détection des capteurs augmente, plus le nombre de groupes redondants diminue et moins les CHs reçoivent des données. Le nombre de transmissions inter-clusters diminue également.

Dans LEACH, la variation du rayon de détection n'influe presque pas sur la consommation d'énergie des CHs. En effet, la consommation d'énergie d'un CH dépend du nombre de réceptions de paquets qui est égale au nombre de nœuds membres du cluster. Ainsi, le nombre de communications ne change pas dans le cluster.

4.6.2 Consommation moyenne d'énergie des nœuds

La figure 4.5 montre la consommation moyenne d'énergie des nœuds durant 20 *rounds* de 25 *secondes* chacun. Dans nos simulations, la durée de 20 *rounds* permet à chaque nœud de prendre toutes les fonctions dans le réseau. Nous remarquons que dans MR-LEACH la consommation d'énergie des nœuds diminue lorsque le nombre de nœuds augmente contrairement dans LEACH. En effet, avec une forte densité, un nœud va communiquer moins avec son CH et les CHs reçoivent moins de paquets du fait de la redondance des mesures. Plus le nombre de nœuds augmente, plus les nœuds sont proches et moins les nœuds transmettent. Donc, il y a moins de communications intra-clusters.

Dans la figure 4.9, nous remarquons que dans MR-LEACH la consommation d'énergie des nœuds diminue quand le rayon de détection augmente contrairement à LEACH. En effet, plus le rayon de détection des capteurs augmente, plus le nombre de nœuds augmente dans chaque groupe redondant. Ainsi, la fréquence des transmissions des nœuds diminue.

4.6.3 Durée de vie moyenne du réseau

Comme le montre les courbes de la figure 4.6, nous remarquons que la durée de vie du réseau est presque stationnaire dans LEACH. Cependant, dans MR-LEACH, cette durée de vie augmente avec le nombre de nœuds. La durée de vie du réseau est strictement liée à la consommation d'énergie des nœuds. Cette consommation d'énergie diminue considérablement quand le nombre de nœuds augmente (comme le montre la figure 4.5).

Dans la figure 4.10, nous remarquons que dans MR-LEACH la durée de vie du réseau augmente quand le rayon de détection augmente. En effet, plus le rayon de détection des capteurs augmente, plus la consommation d'énergie des nœuds diminue.

4.6.4 Délai de bout en bout

Nous remarquons d'après la figure 4.7 que le délai de bout en bout augmente avec la densité du réseau. Cependant, cette augmentation est moins importante dans MR-LEACH du fait de la prise en compte de la redondance de mesure. En fait, le CH dans MR-LEACH attend un nombre $k \ll n$ de paquets avant de faire l'agrégation ; où n est la taille du cluster.

Ce nombre k diminue avec l'augmentation du rayon de détection. Ainsi, le délai de bout en bout diminue (comme le montre la figure 4.11).

4.6.5 Exemples d'applications

Il existe plusieurs applications où en utilisant seulement la proximité géographique et la similarité des données, on peut utiliser la solution proposée (MR-LEACH) sans risque de compromettre la robustesse du système. Parmi lesquelles, on peut citer :

- La collecte de données environnementales (agriculture)
- La surveillance des feux dans les forêts où un capteur envoie des alarmes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil.
- La surveillance du déplacement d'objets (ou personnes) dans un champ
- La surveillance d'édifices (barrages, ponts, voies de chemins de fer, etc.)
- Le contrôle de la climatisation des bâtiments
- Le contrôle industriel
- La surveillance militaire
- etc.

4.6.6 Faiblesses de la solution proposée

Dans la solution MR-LEACH, les CH collectent beaucoup de données pour vérifier leur similarité. Cela pose le problème d'espace mémoire du fait de la taille mémoire très limitée dans les nœuds capteurs.

La vérification de la similarité des données collectées peut solliciter de fortes capacités de calcul si la quantité des données est importante. Cela pose le problème de capacités de calcul car les nœuds capteurs sont généralement caractérisés par de faibles capacités de calcul.

Cette similarité est confortée par une proximité géographique. Dans ce contexte, le recouvrement des zones de couverture peut ne pas être total, cela pose problème dans certaines applications.

Cela nous amène à aborder le problème sous un autre aspect.

4.7 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil qui peuvent être denses dans une zone géographique, trouvent des applications dans de nombreux domaines. Dans ce contexte, il est nécessaire de mettre en place des approches pour une meilleure gestion de ces réseaux. Nous avons proposé MR-LEACH (*Measurement Redundancy aware LEACH*), une technique de regroupement de nœuds capteurs dans les clusters. Il introduit la notion de proximité géographique pour exploiter cette redondance. Cette technique améliore considérablement la consommation d'énergie et offre un meilleur délai de bout en bout.

Le prochain chapitre consiste à présenter une solution adressant l'optimisation de la consommation d'énergie basée sur les modèles de détection dans les RCSF redondants.

Chapitre 5

Optimisation de la consommation d'énergie basée sur les modèles de détection

5.1 Introduction

Les réseaux de capteurs étant généralement déployés de façon aléatoire, il faut donc des techniques efficaces de détection de la redondance afin d'en tirer profit.

Ce chapitre présente le protocole OER (*Optimization of Energy based on Redundancy*), pour optimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs.

Dans ce chapitre, nous proposons une technique de regroupement de nœuds redondants dans les réseaux de capteurs. L'idée générale de notre approche est de déterminer et de regrouper les nœuds redondants de telle sorte qu'un seul nœud représentant par groupe détecte un éventuel événement et envoie sa donnée. Cette technique préconise l'utilisation de la proximité géographique et des modèles de détection pour l'amélioration de l'économie d'énergie.

Nous proposons également une méthode de recherche heuristique de partitionnement optimal. Cette méthode permet de trouver un partitionnement minimisant au mieux la consommation d'énergie.

Les résultats des simulations montrent que notre approche permet de réduire considérablement la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs.

5.2 Modèles de détection

Les modèles de détection estiment la manière dont un nœud est capable de détecter les phénomènes. Il y a essentiellement deux modèles de détection, à savoir, le modèle de détection déterministe et le modèle de détection probabiliste.

5.2.1 Modèle de détection déterministe

Le plus simple des modèles de détection est le modèle déterministe. Ce modèle suppose qu'un nœud est capable de détecter seulement les phénomènes se trouvant dans sa portée de détection (et pas en dehors).

Dans la plupart des travaux antérieurs, la zone de détection est supposé être un disque uniforme de rayon R . Le modèle déterministe (ou modèle à disque) suppose que si un événement se produit à une distance inférieure ou égale à R à partir de l'emplacement du capteur, celui-ci va détecter cet événement de manière déterministe.

D'autre part, un événement survenant à une distance $R + \epsilon$ ($\epsilon > 0$) ne peut pas du tout être détecté, même pour de très petites valeurs de ϵ (cf. Figure 5.1). Le modèle de détection à disque est attractif, car il rend les protocoles de maintien de la couverture moins compliqués à concevoir et à analyser. Il facilite également la modélisation analytique. Cependant, il est peu probable que les signaux physiques chutent brusquement de valeurs élevées ou de pleine puissance à zéro, tel que le suppose le modèle à disque.

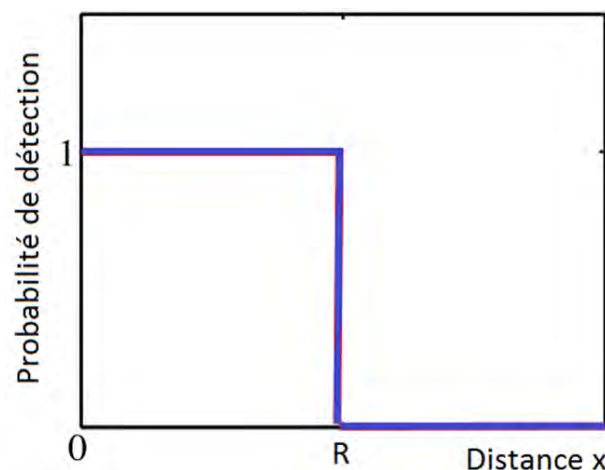


FIGURE 5.1 – Modèle à disque

Cela implique qu'il pourrait y avoir une chance de détecter un événement se

produisant à des distances supérieures à R . En ignorant cette capacité de détection supplémentaire, le modèle de disque ne peut pas utiliser pleinement la capacité de détection des capteurs, ce qui peut conduire : (i) au déploiement de plus de capteurs que nécessaire, et donc générer un coût plus élevé, (ii) à l'activation des capteurs redondants ce qui augmente les interférences et gaspille de l'énergie, et finalement (iii) à la diminution de la durée de vie du réseau.

Dans le modèle de détection déterministe, la probabilité qu'un capteur détecte un événement sur une distance x est :

$$p_{det}(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } x \leq R \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.1)$$

Où, R définit le rayon de détection.

5.2.2 Modèle de détection probabiliste

Une extension plus réaliste du modèle déterministe est le modèle de détection probabiliste.

Plusieurs études [14, 96, 182, 183] ont fait valoir que les modèles de détection probabilistes reflètent le comportement des capteurs de manière plus réaliste que le modèle déterministe à disque. Par exemple, les auteurs de [182, 183] utilisent un modèle de détection exponentiel, où la capacité de détection se dégrade selon une loi exponentielle après un certain seuil, comme représenté sur la Figure 5.2. Alors que dans [14], les auteurs proposent une fonction polynomiale pour modéliser la nature probabiliste de la plage de détection, comme le montre la Figure 5.3.

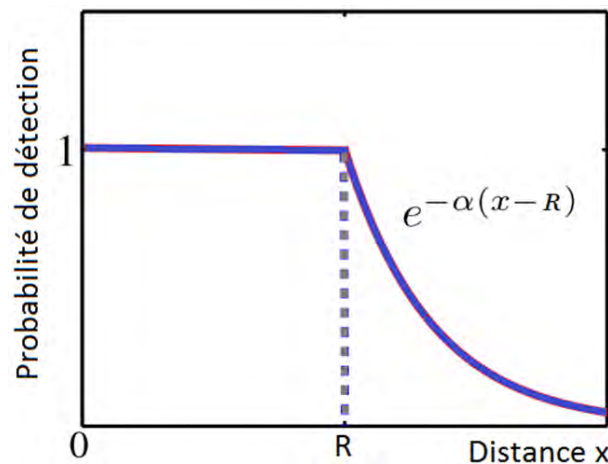


FIGURE 5.2 – Modèle exponentiel [182, 183]

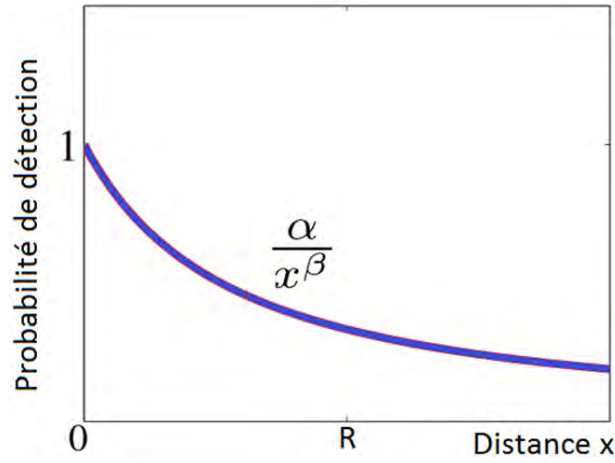


FIGURE 5.3 – Modèle polynomial [14]

En outre, les auteurs de [96] supposent que la zone de détection peut être modélisée en tant que couches de disques concentriques de diamètres croissants, et chaque couche a une probabilité de détection fixe, comme représenté sur la Figure 5.4.

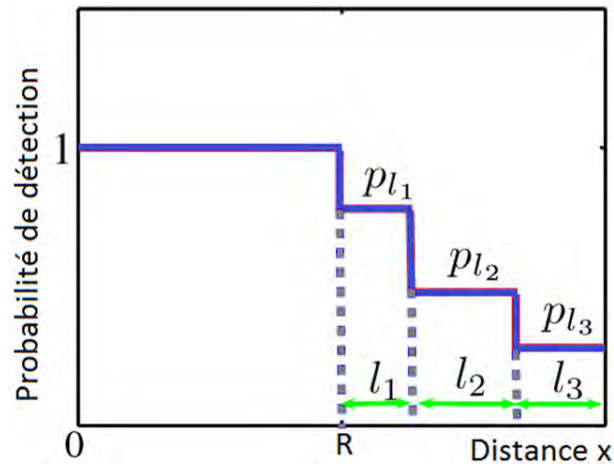


FIGURE 5.4 – Modèle à escalier [96]

Pour la suite de notre étude, nous avons opté pour le modèle de détection probabiliste d'Elfes [3] car c'est le plus utilisé. C'est le seul modèle probabiliste qui précise une distance (R_{max}) à partir de laquelle les nœuds ne détectent plus. Dans ce modèle, la probabilité qu'un capteur détecte un événement sur une distance x est :

$$p_{det}(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } x \leq R \\ e^{-\lambda(x-R)^\beta}, & \text{si } R < x \leq R_{max} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.2)$$

où, R définit le rayon d'incertitude de détection du capteur et les paramètres λ et β sont ajustés selon les propriétés physiques du capteur. R_{max} est le rayon de détection maximal du nœud capteur.

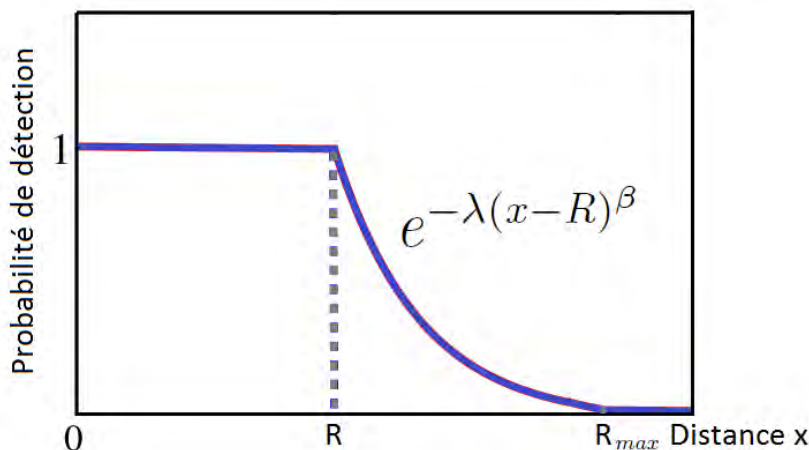


FIGURE 5.5 – Modèle probabiliste d'Elfes

Dans les formules 5.1 et 5.2, $p_{det}(x) = 1$ si $x \leq R$. Donc, il existe une redondance certaine entre des nœuds d'une même région d'événements si le nœud le plus éloigné d'un événement donné est à une distance R de celui-ci.

Un modèle de détection probabiliste est plus réaliste parce que le phénomène à détecter, la conception de capteurs et les conditions environnementales sont tous stochastiques de nature. Par exemple, le bruit et les interférences dans l'environnement peuvent être modélisés par des processus stochastiques. Les capteurs fabriqués par la même usine ne sont pas identiques dans leur comportement. Par ailleurs, leurs caractéristiques sont généralement modélisées en utilisant des distributions statistiques [70].

5.3 Problématique

Les applications des réseaux de capteurs ont tendance à déployer aléatoirement plus de nœuds que nécessaire pour assurer la couverture complète de la zone d'intérêt. Cet excès conduit à une redondance dans les informations relevées, c'est-à-dire qu'il y a des régions surveillées par plusieurs capteurs au même temps, il s'agit de la redondance spatiale.

Le problème de détection de la redondance n'existe pas dans la littérature de manière singulière car il est traité comme étant un sous problème des protocoles

de relocalisation dans les réseaux de capteurs mobiles [26, 175, 176] et surtout d'ordonnancement d'activités des capteurs dans les réseaux de capteurs statiques [28, 27, 16, 25].

Il faut donc des techniques efficaces qui détectent d'abord les capteurs redondants du réseau, ensuite, elles appliquent à ces capteurs un schéma d'ordonnancement, pour les faire passer du mode actif au mode veille de temps à autres et à tour de rôle afin d'optimiser la consommation d'énergie et maximiser la durée de vie du réseau.

Nous présentons dans ce chapitre la manière dont cette redondance est évaluée sachant que nous nous intéressons à la redondance de couverture, qui est engendrée par la présence de plusieurs capteurs au même endroit de la zone d'intérêt. Nous nous intéressons à une technique de partitionnement géographique du réseau.

5.4 Solution heuristique de partitionnement d'un réseau de capteurs

5.4.1 Hypothèses

Pour mieux mettre en évidence notre technique de partitionnement, nous avons choisi comme modèle pour notre cas d'étude, un réseau de capteurs dense. Nous nous basons sur les hypothèses suivantes :

- Le déploiement d'un réseau de capteurs avec un nombre élevé de nœuds.
- Les nœuds sont statiques. Ceci correspond à la majorité des cas dans la pratique : la mobilité n'est pas considérée comme une contrainte dans les réseaux de capteurs sans fils.
- Aucune information sur une éventuelle redondance n'est fournie explicitement.
- Les nœuds captent les événements physiques, génèrent un trafic et l'envoient à la station de base.
- Nous considérons un réseau à un saut où tous les nœuds s'adressent à la station de base. On peut également imaginer une application de ce protocole dans les clusters des réseaux hiérarchisés.

5.4.2 Formulation

Nous traitons la problématique liée l'utilisation de la redondance pour augmenter la durée de vie du réseau en mettant en veille les capteurs à tour de rôle suivant

une méthode optimale de regroupement de nœuds capteurs et une politique d'ordonnancement d'activités. Cette méthode de regroupement utilise une procédure spécifique pour évaluer la redondance dans une région d'événements. Le critère de redondance pour cette méthode est le suivant ; des nœuds sont redondants dans une région d'événements si cette région est entièrement couverte par chacun de ces nœuds.

Dans notre méthode, l'ordonnancement d'activités dans un réseau de capteurs consiste à alterner les charges de façon à épuiser les nœuds équitablement. Pendant qu'une partie participe à l'application, les capteurs redondants sont dans un mode passif, économisant ainsi leur énergie. Cet ordonnancement d'activités des capteurs doit toutefois préserver le but essentiel du réseau, en faisant en sorte que quel que soit l'état des capteurs, la zone d'événements doit être couverte le plus complètement possible.

Pour l'efficacité de notre approche, nous visons à détecter un nombre maximum de capteurs redondants dans les régions d'événements.

5.4.3 Principe

Le protocole OER comporte deux étapes principales : Dans la première étape, nous déterminons et regroupons les nœuds redondants, tandis que dans la seconde étape, nous déterminons si le partitionnement obtenu est meilleur (meilleur au sens de la méthode tabou) pour minimiser une fonction objectif. Le processus est répété jusqu'à ce qu'un partitionnement optimal soit trouvé.

Dès que les nœuds capteurs sont déployés sur le réseau, leur probabilité de détection d'événement est utilisée pour former les groupes de nœuds redondants. La valeur de la fonction objectif est ensuite déterminée.

Après la formation des groupes redondants, en utilisant la valeur de la fonction objectif, nous déterminons si le nouveau partitionnement est meilleur. Nous désignons donc une fonction qui servira à déterminer la meilleure solution. Le but de notre algorithme d'optimisation est alors de minimiser cette fonction en utilisant une recherche tabou. Dans ce qui suit, nous donnons notre fonction objectif.

Après avoir identifié une solution optimale, un seul nœud représentant par groupe enverra ses données à la fois et les autres nœuds arrêtent leurs transmissions. A la fin de la phase d'initialisation, OER entre dans la phase de détection et de transmission. Dans cette phase, un seul nœud est actif à la fois dans un même

groupe redondant. Les nœuds représentant détectent les événements, et envoient leurs données à la station de base.

5.4.4 Fonction objectif

Nous désignons une fonction qui sert de critère pour déterminer la meilleure solution à notre problème de partitionnement. Plus précisément, on associe une valeur à chaque instance de notre problème. Le but de ce problème d'optimisation est alors de minimiser cette fonction, qui est la consommation d'énergie.

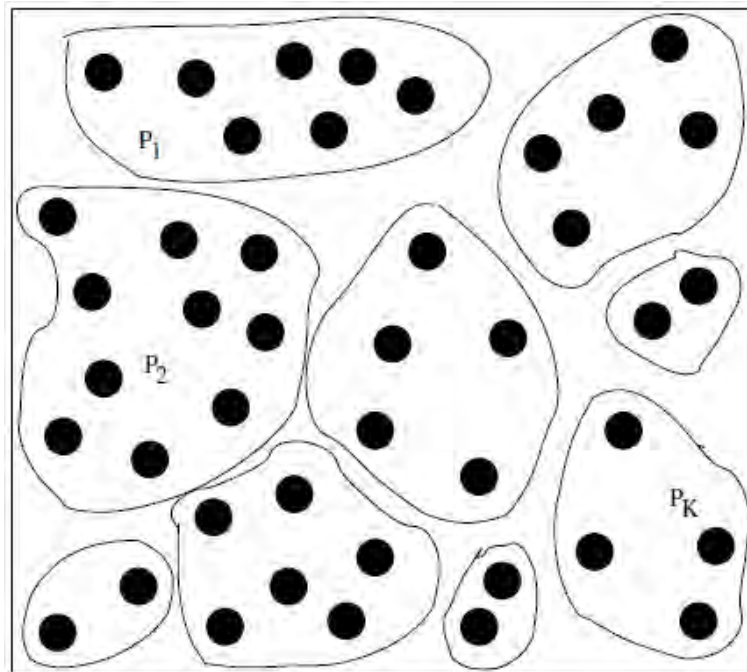


FIGURE 5.6 – Exemple de partitionnement

Soit un réseau de N capteurs déployés. L'algorithme 2 vise à regrouper les nœuds redondants et donc créer des partitions de nœuds. Il s'agit d'un algorithme recevant en entrée l'ensemble de nœuds et fournissant en sortie k partitions.

En considérant un partitionnement P de k partitions, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ ($k \leq N$) comme illustré dans la figure 5.6. Dans ce contexte, une transmission de paquet est faite par un nœud de la partition 1 ou par un nœud de la partition 2 ou ... par un nœud de la partition k .

- La probabilité qu'un nœud de la partition 1 transmette un paquet est : $\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{|p_1|}$ car il faut choisir une partition parmi k partitions et un nœud parmi $|p_1|$ nœuds.
- La probabilité qu'un nœud de la partition 2 transmette un paquet est : $\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{|p_2|}$
- ...

– La probabilité qu'un nœud de la partition k transmette un paquet est : $\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{|p_k|}$

La consommation moyenne d'énergie d'un nœud pour la transmission d'un paquet s'écrit par :

$$E(P) = \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{|p_1|} + \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{|p_2|} + \dots + \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{|p_{k-1}|} + \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{|p_k|} \right) e_{tx} \quad (5.3)$$

$$E(P) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{|p_i|} \cdot e_{tx} \quad (5.4)$$

C'est à dire

$$E(P) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{|p_i|} e_{tx} \quad (5.5)$$

k : nombre de partitions.

$|p_i|$: cardinal de la partition i .

e_{tx} : énergie consommée par la transmission d'un paquet.

$E(P)$: énergie moyenne consommée par un nœud selon le partitionnement P .

Le nombre de transmissions de paquet dans une super-trame correspond au nombre de partitions. Ainsi, la consommation moyenne d'énergie d'un nœud durant une super-trame, avec le partitionnement P , s'écrit :

$$E_G(P) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{|p_i|} e_{tx} \quad (5.6)$$

5.4.5 Algorithmes

5.4.5.1 Algorithme de partitionnement

Pour partitionner le réseau, nous regroupons les nœuds redondants selon les nœuds sélectionnés comme centres des régions d'événements. Pour cela, nous partons d'un nœud sélectionné au hasard qui nous sert de centre d'une première région d'événements. Nous regroupons les nœuds redondants de cette région. Par la suite, nous déplaçons le centre à un autre nœud pour former le prochain groupe redondant. Ce processus est répété jusqu'à ce que chaque nœud soit membre d'un groupe.

D'après les modèles de détection, un nœud détecte un événement situé à une distance inférieure ou égale à R avec une probabilité certaine (égale à 1). Ainsi, nous considérons une région d'événements de rayon R_{ev} ($R_{ev} < R$) (voir figure 5.7).

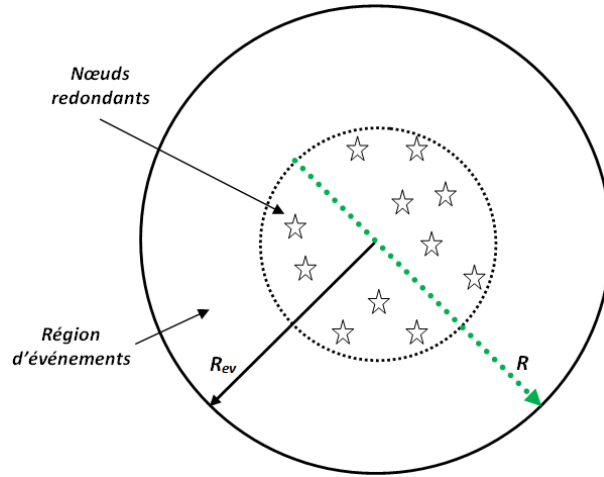


FIGURE 5.7 – Région d'événements

Les nœuds redondants de cette région doivent se situer à une distance ($\leq R$) de tous les points de la région. Pour qu'il y ait donc une proximité géographique et une redondance entre un ensemble de nœuds, il est nécessaire que tous ces nœuds vérifient :

$$d_2(N_i, C_c) \leq R - R_{ev} \quad (5.7)$$

et donc,

$$d_2(N_i, N_j) \leq 2(R - R_{ev}) \quad (5.8)$$

Où, C_c définit le centre de la région d'événements courante, R_{ev} définit le rayon des régions d'événements et le $i^{\text{ème}}$ nœud est représenté par $N_i = (x_i, y_i)$. $d_2(N_i, N_j)$ représente la distance euclidienne entre les nœuds N_i et N_j .

Selon le modèle de détection probabiliste, nous considérons une probabilité seuil (P_t) pour déterminer les nœuds redondants. Pour $R < x \leq R_{max}$ et $\beta = 1$, l'équation 5.2 peut être écrite comme :

$$p_{det}(x) = e^{-\lambda(x-R)} \quad (5.9)$$

En considérant la probabilité seuil (P_t), nous avons :

$$P_t = e^{-\lambda(D_{max}-R)} \quad (5.10)$$

et donc

$$D_{max} = R - \frac{\ln(P_t)}{\lambda} \quad (5.11)$$

Où, P_t définit la probabilité qu'un capteur détecte un événement à une distance D_{max} . Pour qu'il existe une redondance entre un ensemble de nœuds avec une probabilité de P_t , il est nécessaire que :

$$d_2(N_i, N_j) \leq 2(D_{max} - R_{ev}) \quad (5.12)$$

$$d_2(N_i, N_j) \leq 2\left(R - \left(\frac{\ln(P_t)}{\lambda} + R_{ev}\right)\right) \quad (5.13)$$

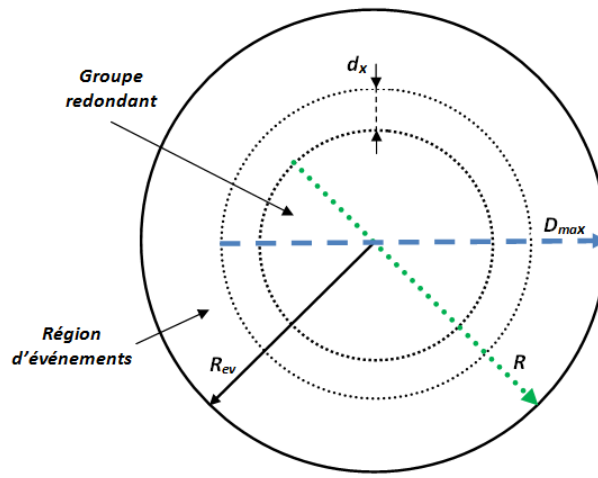


FIGURE 5.8 – Détection des nœuds redondants

Pour former un groupe redondant, nous considérons d'abord un nœud non visité (tirage aléatoire sans remise). Ensuite, nous déterminons tous les nœuds redondants de la région d'événements dont le centre est le nœud précédemment sélectionné. Un groupe redondant est ainsi formé (voir figure 5.8). Enfin, tous les nœuds du groupe formé sont marqués comme visités tel que nous l'avons détaillé dans l'algorithme 2. Pour un partitionnement complet, ce processus est répété jusqu'à ce que tous les nœuds soient marqués comme visités. Un nœud pouvant appartenir à plusieurs partitions, est placé dans la partition qui compte moins de nœuds.

Exemple d'illustration de partitionnement

Considérons un réseau composé de 60 nœuds répartis comme le montre la figure 5.9.

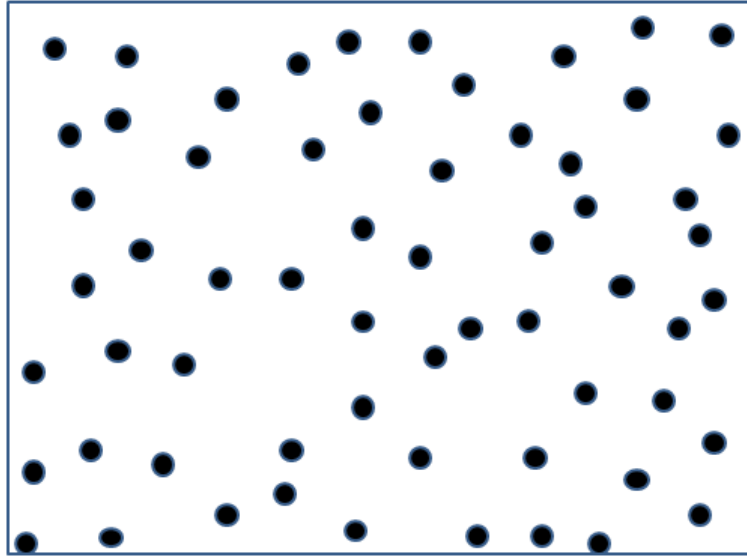


FIGURE 5.9 – Déploiement initial

Nous choisissons aléatoirement un nœud comme étant le centre de la première région d'événements. En fonction de la probabilité P_t , nous identifions les nœuds redondants de cette région d'événements comme le montre la figure 5.10.

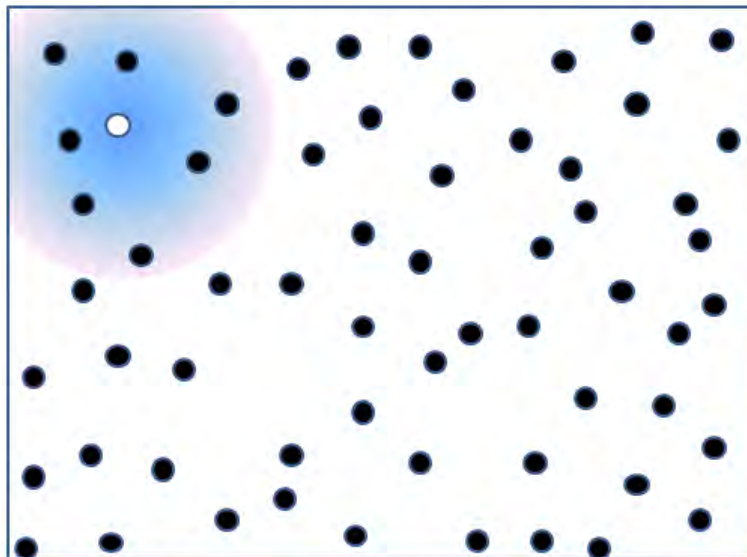


FIGURE 5.10 – Formation du premier groupe redondant

Après avoir formé le premier groupe redondant, nous déplaçons le centre vers un autre nœud n'appartenant pas à un groupe déjà formé. Le prochain groupe est ainsi formé. Nous poursuivons ainsi le même processus comme le montre la figure 5.11.

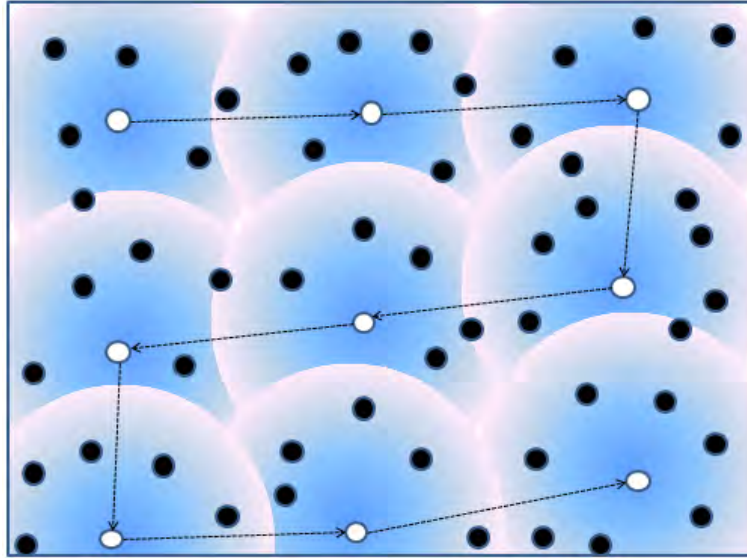


FIGURE 5.11 – Première étape du partitionnement

Après cette première étape du partitionnement, un nœud pouvant appartenir à plusieurs groupes redondants, est placé dans le groupe qui compte moins de nœuds. La figure 5.12 montre le partitionnement définitif.

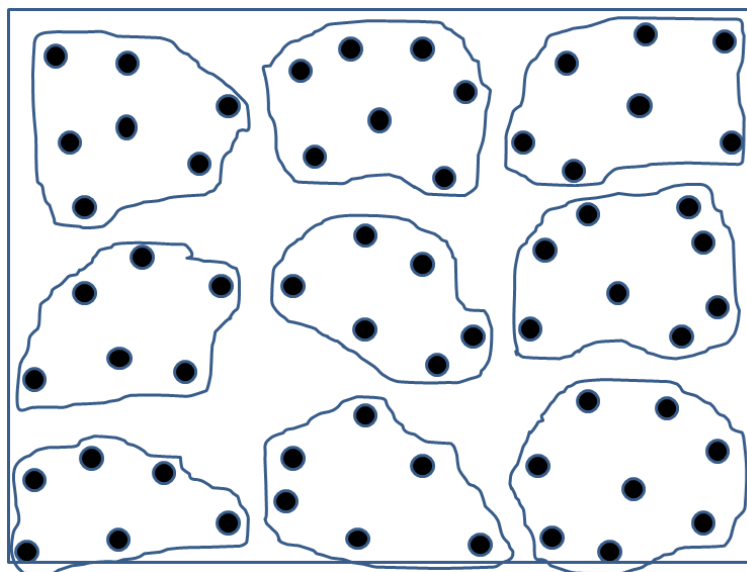


FIGURE 5.12 – Exemple de partitionnement

Nous entendons par solution optimale, le partitionnement qui minimise au mieux la consommation globale du réseau. Ce partitionnement est obtenu en faisant une recherche tabou. Cette recherche utilise notre algorithme de partitionnement pour

regrouper les nœuds redondants et évaluer le coût du partitionnement. A la fin de la recherche, nous obtenons une solution optimale.

Algorithme 2 Procédure partitionning

SetofNodes représente l'ensemble des nœuds ;
Dist représente la distance maximale entre les nœuds d'une même partition ;
SetofStartingNodes représente l'ensemble des nœuds de départ ;
SetofAvailableNodes représente l'ensemble des nœuds non visités jusque là ;
reGroup[][] représente le partitionnement obtenu ;
NumberofGroup représente le nombre de partitions ;
get() représente la méthode qui choisit aléatoirement un nœud ;
compt[] représente la cardinalité des partitions ;

Require: *SetofNodes*, *Dist*, *SetofStartingNodes*

Ensure: *reGroup*[], *NumberofGroup*

```

NumberofGroups  $\leftarrow$  0;
reGroup[][]  $\leftarrow$   $\emptyset$ ;
{the set of nodes is not classified}
Node  $\leftarrow$  SetofStartingNodes.get();
for (i  $\leftarrow$  1; i  $\leq$  SetofNodes.size; i++) do
  if (Node is not visited) then
    mark Node as visited;
    CardGroup  $\leftarrow$  0;
    for (j  $\leftarrow$  0; j < SetofNodes.size; j++) do
      if ( $d_2(\text{Node}_j, \text{Node}) \leq \text{Dist} + \epsilon$  and (Node is not visited)) then
        Group[i][CardGroup]  $\leftarrow$  idNodej;
        CardGroup  $\leftarrow$  j + 1;
        mark Nodej as visited;
      end if
      compt[i]  $\leftarrow$  CardGroup;
    end for
    NumberofGroups  $\leftarrow$  NumberofGroups + 1;
    Update the SetofAvailableNodes;
  end if
  Node  $\leftarrow$  SetofAvailableNodes.get();
end for
{groups calculation}
for (i  $\leftarrow$  0; i < SetofNodes.size; i++) do
  weight  $\leftarrow$  0;
  for (j  $\leftarrow$  0; j < NumberofGroups; j++) do
    for (z  $\leftarrow$  0; z < compt[j]; z++) do
      if (idNodei = Group[j][z] and compt[j] < weight) then
        D  $\leftarrow$  j;
        weight  $\leftarrow$  compt[j];
      end if
    end for
  end for
  reGroup[D][i]  $\leftarrow$  idNodei;
end for
Return reGroup[], NumberofGroup

```

5.4.5.2 Algorithme d'optimisation

Après avoir désigné notre fonction objectif, nous appliquons une recherche tabou. Cette recherche nous permet de trouver une solution optimale ou proche de l'optimal (un partitionnement avec la plus faible consommation d'énergie possible) comme détaillé dans l'algorithme 3. Après avoir trouvé un partitionnement optimal, un seul nœud par partition (le nœud représentant) émet ses données à la station de base, pendant que les autres membres de la partition sont en mode sommeil.

Notre algorithme commence par une configuration initiale s , c'est à dire un partitionnement dans lequel chaque nœud constitue son propre groupe. Initialement, il n'y a donc pas de partitionnement et la liste tabou est vide. Cette liste doit contenir les configurations interdites.

En utilisant notre fonction objectif, l'algorithme cherche et évalue les N_s partitionnements (ou mouvements) non tabous à partir d'un nœud non visité. Il sélectionne le partitionnement s' qui minimise au mieux la fonction objectif. En suite, l'algorithme actualise la meilleure solution (partitionnement) connue si et seulement si la solution actuelle est meilleure que la précédente connue.

En fin, l'algorithme vérifie si le critère d'arrêt est atteint :

- Si oui, la recherche s'arrête et elle considère la meilleure solution connue.
- Si non,
- L'algorithme insère le mouvement $s' - > s$ (partitionnement actuel retenu vers le précédent) dans la liste tabou.
- Le partitionnement actuel s' devient la nouvelle configuration courante.

L'algorithme reprend le processus jusqu'à ce qu'on atteigne le critère d'arrêt comme le montre la Figure 5.13. Dans ce qui suit, nous détaillons ce critère d'arrêt.

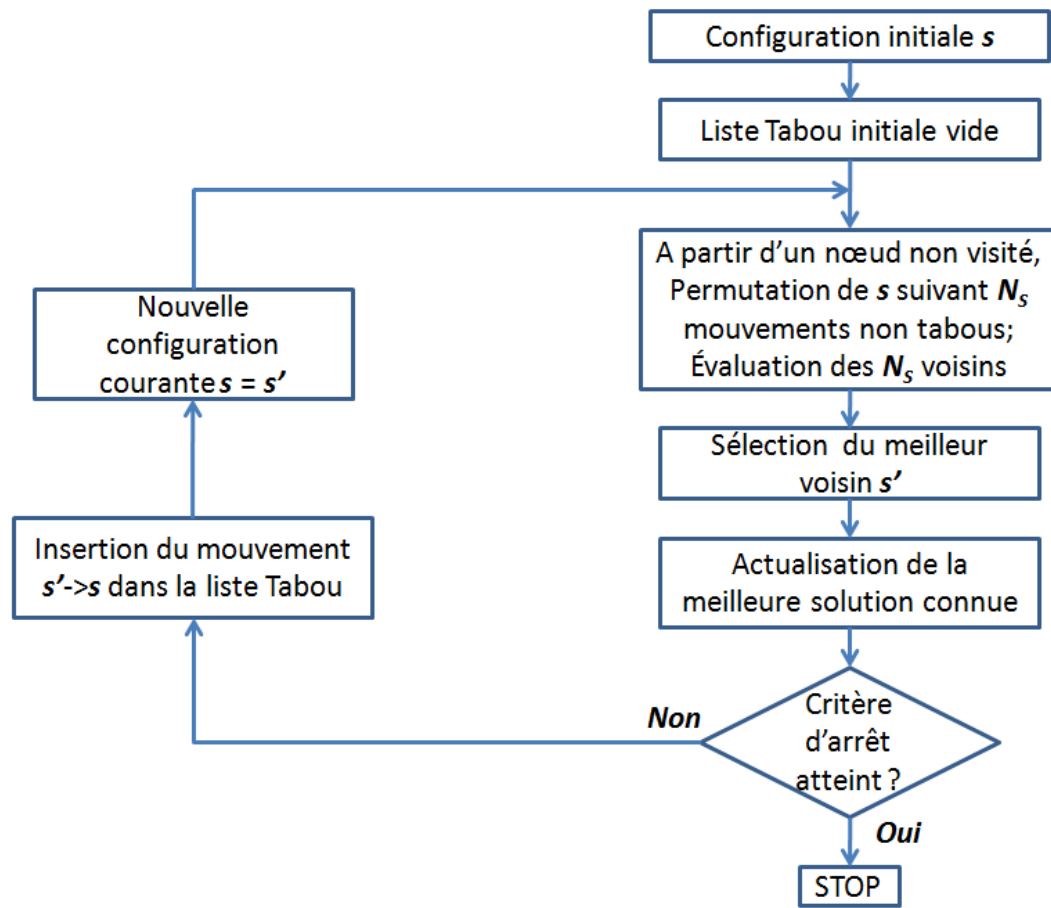


FIGURE 5.13 – Organigramme de la recherche tabou

Critère d'arrêt de la recherche

Le critère d'arrêt cherche un moment idéal pour arrêter la recherche tabou. Ce moment doit correspondre à l'obtention d'une solution optimale (au sens de la recherche tabou) ; une solution qui minimise au mieux la consommation d'énergie.

Notre critère d'arrêt se base principalement sur la densité de voisinage des nœuds. Cette densité donne une bonne orientation sur la création des partitions. En effet, la formation de partitions autour des nœuds à forte densité de voisinage permet d'obtenir un faible nombre de partitions et donc une faible consommation d'énergie.

En outre, la formation d'une partition autour d'un nœud à forte densité de voisinage permet de regrouper un nombre important de nœuds du même voisinage. Ainsi, on regroupe des nœuds à forte densité de voisinage dans une même partition. Il faut donc considérer un faible % de nœuds à forte densité de voisinage comme centres de régions d'événements. Ainsi, plus la densité de voisinage diminue, plus le % de nœuds à considérer comme centres de régions d'événements augmente.

La règle pouvant être définie pour interrompre le déroulement du processus de la recherche tabou est d'arrêter dès qu'une condition ou un ensemble de sous-conditions est vérifié. Nous désignons un critère qui sert de condition d'arrêt pour notre méthode de recherche. Pour cela, nous procédons comme suit :

1. Nous Calculons la densité de voisinage moyenne du réseau :

$$D_{vg} = \text{Nombre_de_nœud} / \text{Surface_Zone}$$

2. Pour chaque nœud i , nous calculons la densité de voisinage du nœud à partir de la table de voisinage des nœuds (table 5.1) :

$$Dn_i = Nn_i / \pi * R_t^2,$$

Nn_i : nombre des voisins du nœud i (un nœud j est voisin du nœud i s'il est atteignable avec le rayon de transmission R_t)

3. Nous normalisons ensuite la densité de voisinage des noeuds :

$$NDn_i = Dn_i / D_{vg}$$

4. Maintenant nous classons les nœuds selon leur densité de voisinage normalisée :

Soit : $ND_{max} = \text{Max}(NDn_i, i = 1, \dots, n)$

- Classe 1 (très denses) : nœuds ayant une densité de voisinage normalisée telle que $NDn_i \geq ND_{max} * P1$
- Classe 2 (denses) : nœuds ayant une densité de voisinage normalisée telle que $ND_{max} * P2 \leq NDn_i < ND_{max} * P1$
- Classe 3 (peu denses) : nœuds ayant une densité de voisinage normalisée telle que $ND_{max} * P3 \leq NDn_i < ND_{max} * P2$
- Classe 4 (très peu denses) : nœuds ayant une densité de voisinage normalisée telle que $NDn_i < ND_{max} * P3$

Nous fixons $P1$ à 80%, $P2$ à 50% et $p3$ à 20%. Cependant, les valeurs de $P1$, $P2$ et $P3$ peuvent être ajustées.

TABLE 5.1 – Voisinage des nœuds

Voisinage
$V(1) = \{1, 2, 4, 5, 6, 8, 12, 18, 19, 72, 81, 94\}$
$V(2) = \{1, 2, 8, 5, 23, 36, 71, 77, 80\}$
$V(3) = \{3, 6, 10, 17, 19, 29, 44, 56, 60, 63, 89, 91, 98\}$
$V(5) = \{1, 2, 4, 5\}$
$V(6) = \{1, 3, 6, 11, 26, 35, 37, 50, 58, 64, 66\}$
$V(7) = \{7, 15, 18\}$
$V(8) = \{8, 16\}$
$V(9) = \{4, 9, 47, 59, 99\}$
... ..
$V(n-2) = \{n-2\}$
$V(n-1) = \{33, 51, 61, 82, n-1\}$
$V(n) = \{13, 26, 32, 38, 45, 70, 82, 85, 90, 93, n\}$

Pour s'assurer que notre méthode de recherche trouve ou s'approche d'une solution optimale, nous avons utilisé un critère d'arrêt qui prend en considération simultanément plusieurs éléments. En effet, pour que la recherche s'arrête, il faut que :

- Les 10% des nœuds de la classe 1 soient visités comme centres de régions d'événements.
- Les 20% des nœuds de la classe 2 soient visités comme centres de régions d'événements.
- Les 50% des nœuds de la classe 3 soient visités comme centres de régions d'événements.
- Les 70% des nœuds de la classe 4 soient visités comme centres de régions d'événements.
- Le rapport du nombre de nouvelles solutions sans amélioration sur le nombre total de solutions trouvées soit supérieur à 50%.

Algorithme 3 Optimisation utilisant la recherche tabou

s^* représente la meilleure solution obtenue jusqu'à là ;
 $NSol$ représente le nombre total de solutions trouvées ;
 k est le nombre d'itérations effectuées depuis la dernière amélioration de s^* ;
 $taux_i$ représente le % de nœuds visités de la classe i ;
 T est liste Tabou ;
 N_s représente le voisinage de la solution s ;
 $f(x)$ est la fonction objectif ;
 $CardN_s$ représente le nombre de voisins de la solution s ;
 $Fonct[]$ représente les valeurs de la fonction $f(x)$ pour les voisins non tabou de s ;
 $Fmax$ représente la valeur maximale de la fonction $f(x)$;
 $SetofStartingNodes$ représente l'ensemble des nœuds de départ ;
 $SetofAvailableNodes$ représente l'ensemble des nœuds non visités jusqu'à là ;

Ensure: s^*

Choisir une solution initiale s ;
 $s^* \leftarrow s$;
 $k \leftarrow 0$;
 $NSol \leftarrow 0$;
 $T \leftarrow \emptyset$;
while $((k/NSol < 50\%) \ \& \ (taux_1 < 10) \ \& \ (taux_2 < 20) \ \& \ (taux_3 < 50) \ \& \ (taux_4 < 70))$ **do**
 if $(N_s - T \neq \emptyset)$ **then**
 Mettre à jour l'ensemble $SetofStartingNodes$;
 $k \leftarrow k + 1$;
 Search $s' \in (N_s - T)$ such as $s' = \min_{x \in N_s - T} f(x)$;
 for $(i \leftarrow 0; i < CardN_s; i++)$ **do**
 Mettre à jour l'ensemble $SetofAvailableNodes$;
 $s'' \leftarrow Partitioning(SetofNodes, Dist, SetofStartingNodes)$;
 if $(s'' \in (N_s - T))$ **then**
 $Fonct[i] \leftarrow f(s'')$;
 else
 $Fonct[i] \leftarrow Fmax$;
 end if
 end for
 $s' \leftarrow \min_{s'' \in N_s - T} Fonct[]$;
 Mettre à jour la liste T ;
 if $(f(s) > f(s'))$ **then**
 $s^* \leftarrow s'$;
 $k \leftarrow 0$;
 end if
 $s \leftarrow s'$;
 $NSol \leftarrow NSol + 1$;
 Mettre à jour le taux des classes de nœuds visités $(taux_1 - taux_4)$;
end if
end while
 Return s^*

5.5 Évaluation de la solution proposée

5.5.1 Environnement de simulation

Pour évaluer les performances de notre solution, nous avons utilisé NS2 qui est un logiciel de simulation de réseaux [167]. Le simulateur se compose d'une interface de programmation en tcl et d'un noyau écrit en C++ dans lequel la plupart des protocoles réseaux ont été implémentés.

Nous avons développé notre solution dans le simulateur NS2 qui offre une possibilité d'intégrer de nouveaux protocoles. Nous avons intégré l'implémentation de nos deux algorithmes proposés.

Les métriques de performance dans notre étude sont les suivantes :

1. Consommation d'énergie : Pour évaluer la consommation d'énergie, nous avons récupéré les niveaux énergie initiaux et les niveaux d'énergie courants des nœuds capteurs à partir des fichiers traces générés par les simulations.
2. La durée de vie : Pour évaluer la durée de vie du réseau, nous avons récupéré à partir des fichiers traces générés par les simulations, le temps après lequel le niveau d'énergie des nœuds est nul. Nous avons observé les niveaux d'énergie au bout de chaque round.

5.5.2 Description et scénarios de la simulation

Nous considérons un réseau de capteurs sans fil déployé sur une surface de $250 * 250 m^2$. Le nombre maximal de nœuds est 1000. Les nœuds connaissent leur position et peuvent la communiquer à la station de base. Les nœuds ont le même rayon de détection. Les nœuds capteurs génèrent un trafic périodique avec un temps d'inter-arrivée moyen égal à 0.2s ce qui correspond à une charge normale de trafic pour un capteur. La taille de trame au niveau MAC est égale à 55 octets. Le débit de transmission est égal à 250Kbits/s. Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau 5.2.

TABLE 5.2 – Paramètres de simulation

Surface de simulation	$250 * 250 \text{ m}^2$
Nombre de nœuds	[100, 1000]
Taille de paquet	55 bytes
Energie initiale des nœuds	2 j
Débit de transmission	250 kbs^{-1}
Puissance de transmission	24.75 mW
Puissance de réception	13.5 mW
Puissance à vide “Idle power”	6.5 mW
Puissance à l’état sommeil “Sleep power”	$15 \mu\text{W}$
Rayon de détection maximal R_{max}	50 m
Rayon d’incertitude de détection R	30 m
Rayon de région d’événements R_{ev}	25 m

Nous proposons trois scénarios de simulations pour étudier les performances de la solution proposée. Le premier considère un déploiement aléatoire (cas plus général). Dans le deuxième scénario, toute la surface du réseau a une densité homogène. Dans le dernier scénario, on étudie le cas d’une densité non-homogène.

5.5.2.1 scénario 1 : cas de déploiement aléatoire

Dans cette série de simulations, la position des nœuds est choisie aléatoirement et le trafic circule entre les nœuds. 50 simulations ont été réalisées : les résultats sont illustrés dans les figures 5.14 et 5.15.

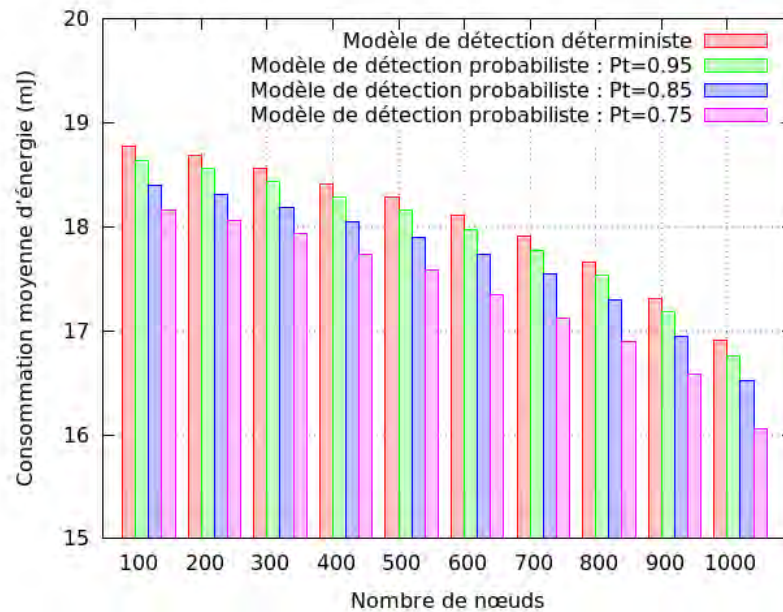


FIGURE 5.14 – Consommation moyenne d’énergie de chaque nœud durant un round

La Figure 5.14 montre la consommation d’énergie par rapport au nombre de nœuds du réseau. Dans cette figure, nous remarquons que la consommation d’énergie diminue si le nombre de nœuds augmente. En effet, plus la densité du réseau augmente, plus la redondance de mesure augmente et moins les nœuds transmettent des données. Avec une forte densité, la taille des partitions augmente. Ainsi, le nombre de communications par nœud diminue dans le temps. La figure 5.14 montre également un écart entre le modèle de détection déterministe et le modèle de détection probabiliste. La consommation d’énergie diminue considérablement avec la probabilité de détection car la distance maximale entre les nœuds redondants augmente.

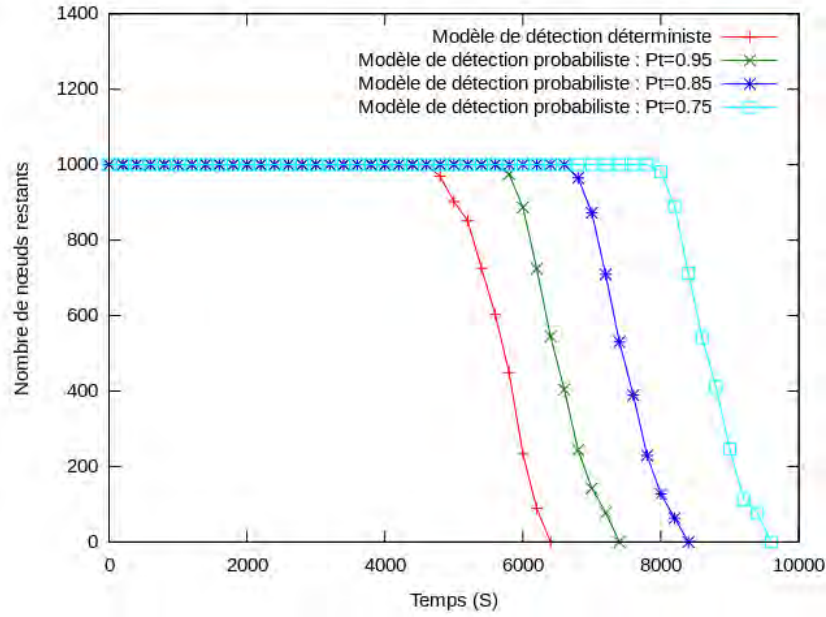


FIGURE 5.15 – Durée de vie moyenne du réseau

Comme l'illustre la Figure 5.15, nous remarquons que la durée de vie du réseau augmente considérablement avec l'utilisation du modèle de détection probabiliste par rapport au modèle déterministe. Si la probabilité seuil P_t diminue, le nombre de nœuds par groupe augmente ce qui entraîne une faible consommation d'énergie.

5.5.2.2 scénario 2 : cas d'une densité homogène

Dans cette série de simulations, la position des nœuds choisie de sorte qu'on ait la même densité dans toute la surface du réseau. 50 simulations ont été réalisées : les résultats sont illustrés dans les figures 5.16 et 5.17.

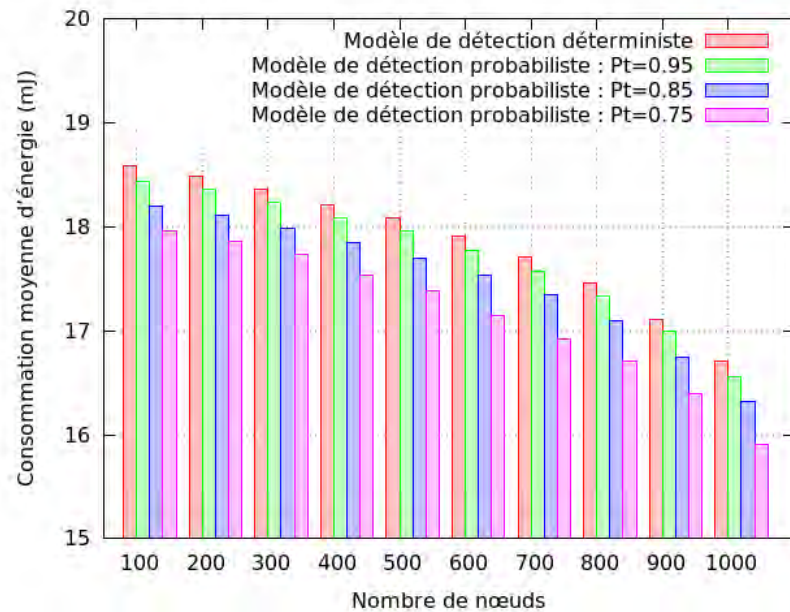


FIGURE 5.16 – Consommation moyenne d'énergie de chaque nœud durant un round

La Figure 5.16 montre la consommation moyenne d'énergie par rapport au nombre de nœuds du réseau. Dans cette figure, nous remarquons que la consommation d'énergie diminue si le nombre de nœuds augmente. Cependant, cette consommation est moins importante que dans un déploiement aléatoire (voir figure 5.14). En effet, plus un nœud est isolé, plus il transmet des données.

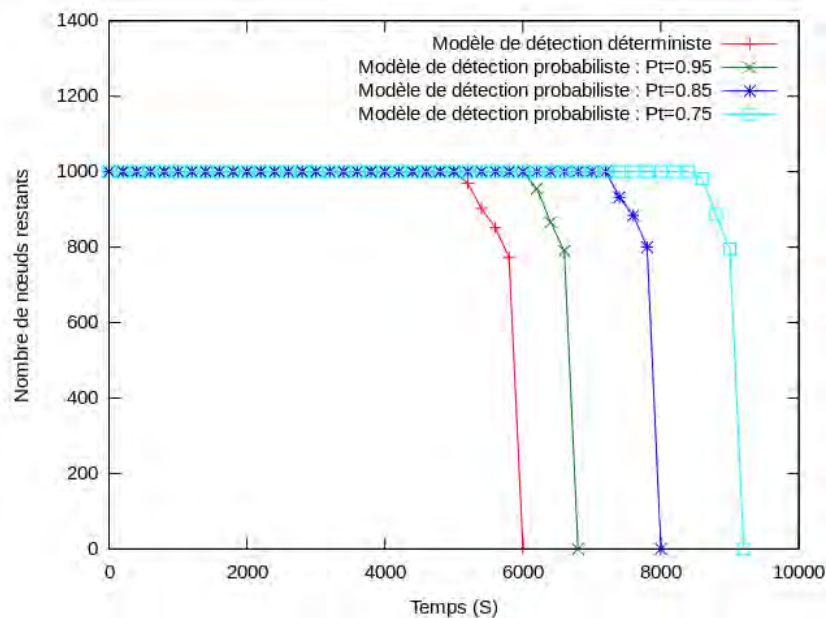


FIGURE 5.17 – Durée de vie moyenne du réseau

Comme l'illustre la Figure 5.17, nous remarquons que la durée de vie du réseau augmente considérablement avec l'utilisation du modèle de détection probabiliste par rapport au modèle déterministe. Si la probabilité seuil P_t diminue, le nombre de nœuds par groupe augmente ce qui entraîne une faible consommation d'énergie. De plus, la couverture totale du réseau est assurée durant toute sa durée de vie. La figure 5.17 montre bien que tous les nœuds épuisent leur batterie pratiquement au même moment. En effet, dans un déploiement à densité homogène, les nœuds ont une même charge.

5.5.2.3 scénario 3 : cas d'une densité non-homogène

Dans cette série de simulations, nous créons des zones à forte densité et des zones à faible densité. 50 simulations ont été réalisées : les résultats sont illustrés dans les figures 5.18 et 5.19.

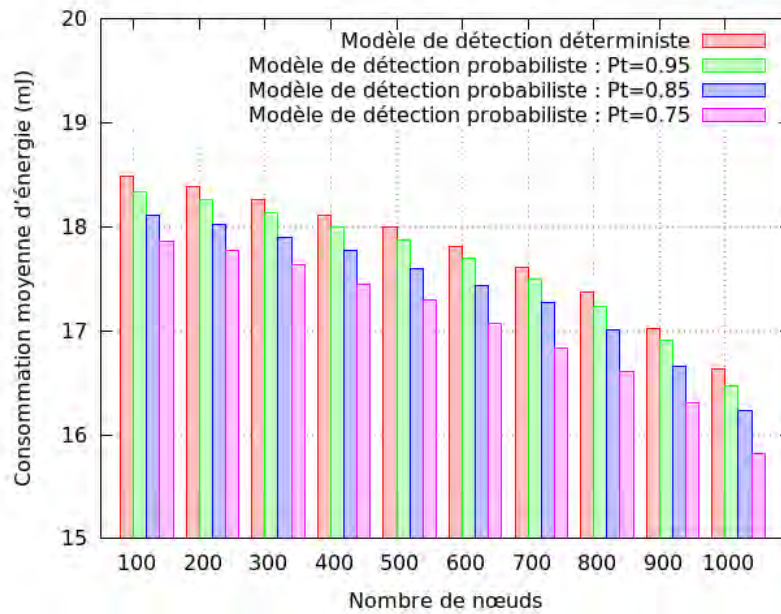


FIGURE 5.18 – Consommation moyenne d'énergie de chaque nœud durant un round

La Figure 5.18 montre la consommation moyenne d'énergie par rapport au nombre de nœuds du réseau. Dans cette figure, nous remarquons que la consommation d'énergie diminue si le nombre de nœuds augmente. La figure 5.18 montre également un écart entre les modèles de détection. En effet, plus la probabilité seuil P_t diminue, plus le nombre de nœuds par groupe dans les zones denses augmente et moins il y a des transmissions dans ces zones.

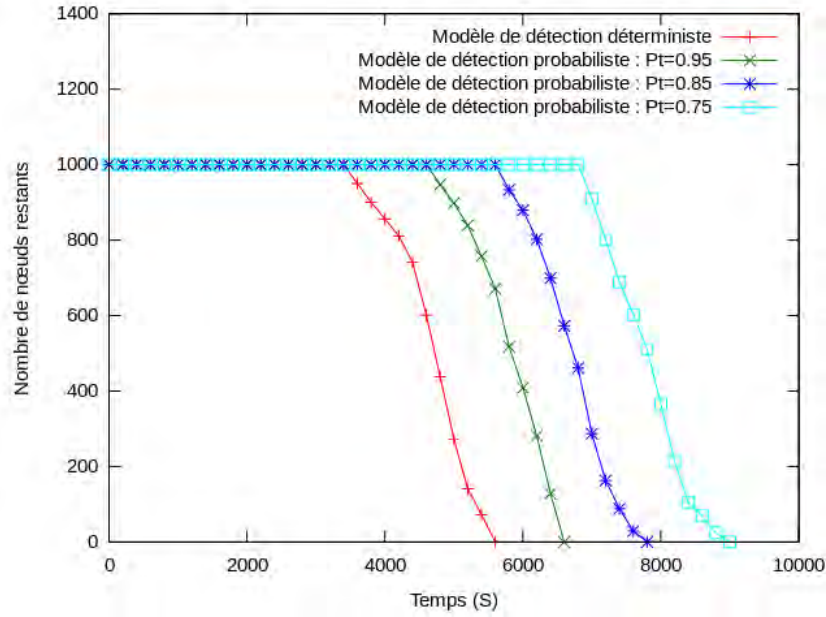


FIGURE 5.19 – Durée de vie moyenne du réseau

Comme l'illustre la Figure 5.19, nous remarquons que la durée de vie du réseau augmente avec l'utilisation du modèle de détection probabiliste par rapport au modèle déterministe. En effet, la probabilité seuil P_t diminue avec la consommation d'énergie dans les zones à forte densité. Cependant, la couverture totale du réseau n'est pas assurée pour longtemps. En effet, les nœuds des zones à faible densité épuisent très vite leur batterie. Ces nœuds communiquent plus fréquemment dans le réseau.

Le modèle de détection probabiliste reflète le caractère incertain de détection des nœuds capteurs. Dans ce modèle, le capteur a toujours une zone de détection incertaine. Un nœud pourrait détecter avec une probabilité ($P_t < 1$) un événement situant dans un intervalle compris entre R et R_{max} . Cependant, la région d'événements correspondante a une couverture (< 1) qui décroît avec la probabilité P_t . En effet, en relâchant sur la probabilité de couverture, on réduit d'avantage la consommation d'énergie des nœuds. Avec la probabilité de détection $P_t = 1$ ($distance \leq R$), toutes les régions d'événements ont une couverture (> 1).

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une technique de regroupement de nœuds redondants dans les réseaux de capteurs. L'idée générale de notre approche est de déterminer et de regrouper les nœuds redondants de telle sorte qu'un seul nœud

représentant par groupe détecte un éventuel événement et envoie sa donnée. Cette technique préconise l'utilisation de la proximité géographique et des modèles de détection pour l'amélioration de l'économie d'énergie.

Nous avons proposé le protocole OER (*Optimization of Energy based on Redundancy*), afin d'optimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Ce protocole introduit une méthode de recherche heuristique de partitionnement optimal. Cette méthode améliore considérablement la consommation d'énergie et augmente ainsi leur durée de vie.

Conclusion et Perspectives

Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil doivent leur essor fulgurant à la panoplie d'applications offertes par cette technologie née de l'évolution vers la miniaturisation de plus en plus poussée des composants. Les perspectives applicatives offertes par les réseaux de capteurs sans fil sont nombreuses et variées. Cependant, la durée de vie des réseaux est encore actuellement un facteur limitant le développement de ces applications. Il est donc nécessaire de concevoir des protocoles de communication et d'auto-organisation permettant de minimiser l'énergie consommée dans le réseau, ainsi que des plateformes matérielles à faible consommation.

Cette thèse a porté sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des réseaux de capteurs sans fil denses.

Dans cette thèse nous avons traité le problème de la redondance dans les réseaux de capteurs. Cet aspect est fondamental pour ce genre de réseaux caractérisés par le déploiement d'un grand nombre de nœuds. La redondance représente pour les réseaux de capteurs une caractéristique qui est à la fois rentable et pénalisante. Elle peut être utilisée pour améliorer la fiabilité de la détection ou l'exactitude des données collectées. En revanche, elle engendre un transfert de données plus important et implique une charge de trafic supplémentaire. Ce constat nous motive à renforcer ses aspects positifs. Les solutions doivent prendre en compte les contraintes matérielles d'un capteur : une source d'énergie faible, une capacité de stockage modeste, une bande passante faible, etc. Lorsque la taille du réseau devient plus importante, sa gestion devient plus difficile. D'où vient l'idée de partitionner le réseau en groupes nœuds redondants. Pour atteindre cet objectif, nous avons proposé deux nouveaux protocoles nommés MR-LEACH (*Measurement Redundancy aware LEACH*) et OER (*Optimization of Energy based on Redundancy*).

La première approche développée dans cette thèse concerne la conservation d'énergie fondée sur redondance de mesure. Le protocole proposé MR-LEACH

s'adresse à la problématique posée par l'absence de gestion efficace d'énergie au sein des grands réseaux de capteurs hiérarchiques. MR-LEACH est une extension du protocole LEACH bien connu pour améliorer la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. En plus de la formation du cluster selon le protocole LEACH, les nœuds sont regroupés en tenant compte de leur redondance et un seul nœud transmet à la fois les données dans chaque groupe redondant. Cette méthode a les avantages de présenter une faible consommation d'énergie, d'accroître la durée de vie du réseau et de réduire le délai de bout en bout.

Le protocole OER est la seconde contribution de cette thèse. L'objectif est double. Nous avons proposé tout d'abord une méthode de partitionnement de réseaux de capteurs fondée sur les modèles de détection. Les modèles de détection estiment la manière dont un nœud est capable de détecter les phénomènes. Il s'agit ensuite de proposer un algorithme de recherche d'un partitionnement optimal. Nous nous sommes focalisés sur la variation d'une fonction objectif. Le protocole OER détermine si un partitionnement obtenu est meilleur pour minimiser la fonction objectif. Par la suite, l'impact de la recherche de solution optimale sur la durée de vie du réseau a été étudiée.

Afin de montrer le bon comportement des protocoles proposés, nous avons réalisé des simulations. Nous avons utilisé le simulateur NS2 qui offre une possibilité d'intégrer de nouveaux protocoles. Le simulateur se compose d'une interface de programmation en tcl et d'un noyau écrit en C++ dans lequel la plupart des protocoles réseaux ont été implémentés.

Les simulations ont montré, dans la plupart des cas, une faible consommation énergétique, un prolongement de la durée de vie du réseau et un faible délai de bout en bout.

Perspectives

Les réseaux de capteurs constituent un axe de recherche très fertile et ont de nombreuses perspectives d'application dans des domaines très variés : domotique, surveillance industrielle et environnementale, etc. Il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans les conditions réelles. En outre, chaque application a ses propres contraintes. De ce fait, la conception d'un réseau de capteurs est une tâche très difficile parce qu'elle devra combiner les contraintes propres aux systèmes distribués et aux systèmes embarqués.

Dans cette thèse, nous avons utilisé des modèles de couverture circulaire pour le développement de MR-LEACH et OER. Dans ce type de couverture, la zone couverte par un nœud est considérée comme toujours circulaire : la portée de détection de chaque nœud est confinée dans un disque circulaire de rayon donné. Une étude sur d'autres types de couverture (comme le type de couverture angulaire), pourrait être envisagée afin de fournir au concepteur une marge de possibilités dans le choix de déploiement. En outre, ces différentes études devraient être faites sur des formes différentes de détection dans la zone de surveillance étant donné qu'elles ont chacune des spécificités.

Une autre perspective est de proposer une méthode d'agrégation de données. En effet, dans cette méthode, plusieurs nœuds qui sont à proximité d'un certain événement communiquent dans le but de fusionner les données collectées. L'agrégation permettrait de minimiser le nombre d'envois des données collectées identiques par plusieurs nœuds voisins afin de les acheminer vers la destination finale. Ainsi, on prolonge la durée de vie du système en minimisant d'avantage l'envoi et la réception des paquets.

Enfin une dernière idée concernant l'optimisation du réseau de niveau supérieur pourrait être une extension à nos travaux de recherche. Par exemple, le contrôle de la puissance d'émission des puits, ou encore un protocole de routage géographique, qui paraît bien adapté à la situation, pourraient réduire l'occupation de la bande passante et la consommation d'énergie.

Bibliographie

- [1] A. Manjeshwar and D.P. Agrawal. Apteem : a hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. In *Parallel and Distributed Processing Symposium., Proceedings International, IPDPS 2002, Abstracts and CD-ROM*, pages 195 –202, 2002.
- [2] Alberto Cerpa and Deborah Estrin. Ascent : Adaptive self-configuring sensor networks topologies. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3(3) :272-285, 2004.
- [3] Ashraf Hossain, PK Biswas, and S Chakrabarti. Sensing models and its impact on network coverage in wireless sensor network. In *Industrial and Information Systems, 2008. ICIIS 2008. IEEE Region 10 and the Third international Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2008.
- [4] A. Manjeshwar, D.P. Agrawal. TEEN : a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. *Proceedings 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium*. 2001, pp. 2009-2015.
- [5] Al-Karaki, Jamal N. and Ul-Mustafa, Raza and Kamal, Ahmed E. Data aggregation and routing in Wireless Sensor Networks : Optimal and heuristic algorithms. *Computer Networks : The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*. 2009, Vol. 53, 7, pp. 945-960.
- [6] Al-Karaki, Jamal N. and Ul-Mustafa, Raza and Kamal, Ahmed E. Data aggregation in wireless sensor networks - exact and approximate algorithms. *High Performance Switching and Routing, HPSR 2004*. 2004, pp. 241-245.
- [7] Akyildiz, I. F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam et E. Cayirci (2002). Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks*, 38(4), 393 – 422.
- [8] Aman Kansal, Aditya Ramamoorthy, Mani B. Srivastava, and Gregory J. Pottie. On sensor network lifetime and data distortion. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT'05)*, pages 6-10, Adelaide, Australia, September 4-9 2005.

- [9] A. Savvides, C.C. Han, and M. Srivastava. Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors. 7th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom). July 2001, pp. 166-179.
- [10] Arvind Giridhar and P. R. Kumar. Maximizing the functional lifetime of sensor networks. In Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05), page 2, Piscataway, NJ, USA, 2005. IEEE Press.
- [11] Arnab Chakrabarti, Ashutosh Sabharwal, and Behnaam Aazhang. Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks. In Proceedings of the 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03), pages 129-145, Palo Alto, CA, USA, 2003.
- [12] A. Savvides, C.C. Han, and M.B. Strivastava. Dynamic finegrained localization in ad-hoc networks of sensors. In International Conference on Mobile Computing and Networking : Proceedings of the 7 th annual international conference on Mobile computing and networking, volume 2001, pages 166–179, 2001.
- [13] B. Carbunar, A. Grama, J. Vitek, and O. Carbunar. Redundancy and coverage detection in sensor networks. In ACM Transactions on Sensor Networks, Vol 2(1) pages :94-128, 2006.
- [14] B. Liu and D. Towsley, “A study on the coverage of large-scale sensor networks,” in Proc. IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS'04), Fort Lauderdale, Florida, October 2004, pp. 475–483.
- [15] Bogdan Carbunar, Ananth Grama, Jan Vitek, and Octavian Carbunar. Redundancy and coverage detection in sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks, 2(1) :94-128, 2006.
- [16] C. Huang, Y.C. Tseng and H.L. Wu, «Distributed protocols for ensuring both coverage and connectivity of a wireless sensor network», ACM Transactions on Sensor network (ToSN), Vol.3, March 2007.
- [17] Capteurs TinyNode. [http ://www.tinynode.com/](http://www.tinynode.com/).
- [18] Crossbow sensor platform. [http ://www.xbow.com/](http://www.xbow.com/).
- [19] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed diffusion : A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In MOBI-COM Boston MA USA, 2000.
- [20] Carla-Fabiana Chiasserini, Imrich Chlamtac, Paolo Monti, and Antonio Nucci. Energy efficient design of wireless ad hoc networks. In Proceedings of

- the 2nd International IFIP-TC6 Networking Conference on Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; and Mobile and Wireless Communications (NETWORKING'02), pages 376-386, London, UK, 2002. Springer-Verlag.
- [21] Caimu Tang and Cauligi S. Raghavendra. Compression techniques for wireless sensor networks. *Wireless Sensor Networks*, pages 207-231, 2004.
- [22] Cesare Alippi, Giuseppe Anastasi, Cristian Galperti, Francesca Mancini, and Manuel Roveri. Adaptive sampling for energy conservation in wireless sensor networks for snow monitoring applications. In *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'07)*, pages 1-6, Pisa, Italy, October 2007.
- [23] Curt Schurgers, Vlasios Tsiatsis, and Mani B. Srivastava. STEM : Topology management for energy efficient sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, volume 3, pages 78-89, Big Sky, Montana, USA, 2002.
- [24] D. Curiac, V. Constantin, P. Dan, J. Lucian and D. Alexa, «Redundancy and Its Applications in Wireless Sensor Networks : A Survey», *WSEAS Transactions on Computers*, Vol. 8, Issue 4, pp. 705-714, April 2009.
- [25] E. Bulut, Z. Wang et K. Szymanski, «The Effect of Neighbor Graph Connectivity on Coverage Redundancy in Wireless Sensor Networks». In *Proc. Of International Conference on Communications (ICC)*, pp.1-5, South Africa, May 23-27, 2010.
- [26] G. Wang, G. Cao, T. L. Porta and W. Zhang «Sensor Relocation in Mobile Sensor Networks», In *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2005.
- [27] H. Bai, X. Chen and X. Guan, «Preserving coverage for wireless sensor networks of nodes with various sensing ranges», In *Proc. of the 06th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, pp. 54-59, April 2006.
- [28] K. Wu, Y. Gao, F. Li, and Y. Xiao, «Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks», *ACM/Kluwer Mobile Networks and applications*, December 2005.
- [29] Jun Zheng and Abbas Jamalipour. *Wireless Sensor Networks : A Networking Perspective*. Wiley-IEEE October (2009).
- [30] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal. Wireless sensor network survey. *Computer Networks* 52(12), 2292 – 2330 (2008).
- [31] I. F. Akyildiz, S. Weilian, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*, 40(8), 2002.

- [32] Tmote Sky datasheet. [http ://www.moteiv.com/products/docs/tmote-skydatasheet.pdf](http://www.moteiv.com/products/docs/tmote-skydatasheet.pdf).
- [33] R. Kacimi, R. Dhaou, A.-L. Beylot, A. Delye de Mazieux, V. Gauthier, M. Marot, J. Vaudour, and M Becker. Etat de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil. In Livrable Projet CAPTEURS, SP1, V1.2, IRIT-ENSEEIH et INT, Rapport de recherche INT *n*°05001 RST, 2006.
- [34] K. Langendoen and G. Halkes. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In 1st international conference on Embedded networked sensor systems, pages :171-180, Los Angeles, California, USA, 2003.
- [35] Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, André-Luc Beylot, Load balancing techniques for lifetime maximizing in wireless sensor networks, Ad Hoc Networks, Volume 11, Issue 8, November 2013, Pages 2172-2186, ISSN 1570-8705, Elsevier. [http ://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2013.04.009](http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2013.04.009).
- [36] J. Pan, Y.T. Hou, L. Cai, Y. Shi, and S.X. Shen, "Topology Control for Wireless Sensor Networks," in Proc. of the 9th ACM MobiCom, 2003.
- [37] W. Ye and J. Heidemann. Medium access control in wireless sensor networks. In USC/ISI technical report ISI-TR-580, 2003.
- [38] G. Chalhoub. Macari : Une méthode d'accès déterministe et économe en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. In Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France, 2009.
- [39] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, A survey on sensor networks, IEEE Communications Magazine 40 (8) (2002) 104–112.
- [40] S. Toupis, T. Tassiulas, Optimal deployment of large wireless sensor networks, IEEE Transactions on Information Theory 52 (2006) 2935–2953.
- [41] I.F. Akyildiz, E.P. Stuntebeck, Wireless underground sensor networks : research challenges, Ad-Hoc Networks 4 (2006) 669–686.
- [42] M. Li, Y. Liu, Underground structure monitoring with wireless sensor networks, in : Proceedings of the IPSN, Cambridge, MA, 2007.
- [43] I.F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia, Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks, ACM Sigbed Review 1 (2) (2004) 3–8.
- [44] J. Heidemann, Y. Li, A. Syed, J. Wills, W. Ye, Underwater sensor networking : research challenges and potential applications, in : Proceedings of the Technical Report ISI-TR-2005-603, USC/Information Sciences Institute, 2005.

- [45] I.F. Akyildiz, T. Melodia, K.R. Chowdhury, A survey on wireless multimedia sensor networks, *Computer Networks Elsevier* 51 (2007) 921–960.
- [46] I. Akyildiz, W. Su, E. Cayirci, Y. Sankarasubramaniam. "A survey on sensor networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. Août 2002.
- [47] Séverine Sentilles « Architecture logicielle pour capteurs sans-fil en réseau » Rapport de recherche, Université de Pau et des Pays de l'Adour, juin 2006.
- [48] Rahim Kacimi, Riadh Dhaou, André-Luc Beylot. Using energy-efficient wireless sensor network for cold chain monitoring. In *IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2009)*, Las Vegas, Nevada, USA, IEEE, p. 1-5, January 2009.
- [49] I.F. Akyildiz. Wireless sensor networks. In *Lecture Notes, IFA'07*, Georgia Institute of Technology, 2007.
- [50] C.-F. Chiasserini and M. Garetto. Modeling the performance of wireless sensor networks. In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2004.
- [51] Y. Yu, B. Hong and V.K. Prasanna. Communication models for algorithm design in wireless sensor networks, *IPDPS'05* (2005).
- [52] J. Zhao and R. Govindan. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks. In *SenSys '03 : Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 1-13, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [53] X. Yang and R.J.Mondragon. Connectivity Improvement by Delayed Transmission for Different Mobility Models of Ad-hoc Networks. *The 19th International Teletraffic Congress (ITC19), Performance Challenges for Efficient Next Generation Networks*, Beijing, China (2005).
- [54] I. Ledvich and A. Segall. Threshold-related throughput a new criterion for evaluation of sensor network performance. In *CCIT Report 552*, available from [http ://www.comnet.technion.ac.il/segall/reports](http://www.comnet.technion.ac.il/segall/reports), Dept. of EE, Technion, Israel, August 2005.
- [55] H. Karl and A. Willig. Protocols and architectures for wireless sensor networks. In *Wiley*, 2005.
- [56] V.P. Mhatre, C. Rosenberg, D. Kofman, R. Mazumdar, and N. Shro. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. In *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol 4(1) pp :4-15, January-February 2005.

- [57] X. Li and L. Cuthbert. DiffServ over Multipath Routing : QoS Provisioning for Mobile Ad hoc Networks, In Proceedings of the 19th International Teletraffic Congress (ITC19), Beijing, China, August 29 - September 2, 2005.
- [58] Jennic Wireless Microcontrollers. [http ://www.jennic.com/index.php](http://www.jennic.com/index.php).
- [59] TinyOs Community Forum. [http ://www.tinyos.net/](http://www.tinyos.net/).
- [60] T-Node de SOWNet. [http ://www.sownet.nl/](http://www.sownet.nl/).
- [61] Réseaux de Capteurs Sans Fils. [http ://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_1.html](http://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_1.html)
- [62] D. Tian and N.D. Georganas. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), pages 32-41, New York, NY, USA, 2002.
- [63] Kristofer, Pister. [http ://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/](http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/). SmartDust. [En ligne] 2001.
- [64] Crossbow. MICA2 Data sheet. [Online] 2009. [http ://www.xbow.com/products/Product-pdf-files/Wireless-pdf/MICA2-Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/products/Product-pdf-files/Wireless-pdf/MICA2-Datasheet.pdf).
- [65] D.M. Blough and P. Santi. Investigating upper bounds on network lifetime extension for cell-based energy conservation techniques in stationary ad hoc networks. In Proceedings of the 8th annual ACM international conference on Mobile Computing and networking (MobiCom'02), pages 183-192, New York, NY, USA, 2002.
- [66] S. Kumar, A. Arora, and T.H. Lai. On the lifetime analysis of always-on wireless sensor network applications. In Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS'05), pages 186-188, Washington, DC, USA, November 2005.
- [67] R. Shah and J. Rabaey. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'02), Orlando, Florida, USA, March 2002.
- [68] W.B. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99), Seattle, WA, USA, August 1999.
- [69] F. Silva, J. Heidemann, R. Govindan, and D. Estrin. Directed diffusion. In USC/ISI Technical Report ISI-TR-2004-586, 2004.

- [70] M. Hefeeda and H. Ahmadi, "A Probabilistic Coverage Protocol for Wireless Sensor Networks," in Proc. of IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP 2007), pp.41,50, 16-19 Oct. 2007.
- [71] D. Braginsky and D. Estrin. Rumor routing algorithm for sensor networks. In Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, USA, October 2002.
- [72] Y. Yao and J. Gehrke. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. In SIGMOD Record, September 2002.
- [73] N. Sadagopan, B. Krishnamachari, and A. Helmy. The acquire mechanism for efficient querying in sensor networks. In Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications, Anchorage, AK, USA, May 2003.
- [74] K. Kalpakis, K. Dasgupta, and P. Namjoshi. Maximum lifetime data gathering and aggregation in wireless sensor networks. In Proceedings of IEEE International Conference on Networking (NETWORKS'02), Atlanta, GA, USA, August 2002.
- [75] K. Dasgupta, K. Kalpakis, and P. Namjoshi. An efficient clustering-based heuristic for data gathering and aggregation in sensor networks. In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'03), New Orleans, LA, USA, March 2003.
- [76] F. Ye, A. Chen, S. Lu, and L. Zhang. A scalable solution to minimum cost forwarding in large scale sensor networks. In Proceedings of International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), Dallas, TX, USA, October 2001.
- [77] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G.J. Pottie. Protocols for selforganization of a wireless sensor network. In IEEE Personal Communications, Vol. 7, Issue 5, pp. 16-27, 2000.
- [78] T. He, J.A. Stankovic, C. Lu, and T. Abdelzaher. Speed : a stateless protocol for real-time communication in sensor networks. In Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems, Providence, RI, USA, May 2003.
- [79] V. Rodoplu and T.H. Ming. Minimum energy mobile wireless networks. In IEEE Journal of Selected Areas in Communications, Vol 17 (8) (1999) pp : 1333-1344, 1999.

- [80] L. Li and J.Y Halpern. Minimum energy mobile wireless networks revisited. In Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'01), Helsinki, Finland, June 2001.
- [81] B. Karp and H.T. Kung. Gpsr : greedy perimeter stateless routing for wireless sensor networks. In Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00), Boston, MA, USA, August 2000.
- [82] M. Becker and A.L. Beylot. Simulation des réseaux. In *Traité IC2, Série Réseaux et Télécoms*, Hermes, 2006.
- [83] Sun SPOT World. [http ://www.sunspotworld.com](http://www.sunspotworld.com). Last access, Mar. 2010.
- [84] EasySen WiEye Sensor Board. [http ://www.easysen.com/wieye.htm](http://www.easysen.com/wieye.htm). Last access, Mar. 2010.
- [85] Silicon Labs. [http ://www.silabs.com/Pages/default.aspx](http://www.silabs.com/Pages/default.aspx).
- [86] Microchip Wireless Devices. [http ://www.microchip.com/](http://www.microchip.com/).
- [87] Isabel Dietrich and Falko Dressler. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 5(1) :1-39, 2009.
- [88] L. K. Alazzawi, A. M. Elkateeb, A. Ramesh, and W. Aljuhar, “Scalability Analysis for Wireless Sensor Networks Routing Protocols,” *Advanced Information Networking and Applications Workshops, International Conference on*, vol. 0, pp. 139–144, 2008.
- [89] M. U. Ilyas and H. Radha, “End-to-end channel capacity of a wireless sensor network under reachback,” *CISS*, Mar. 2006.
- [90] O. Dousse, P. Mannersalo, P. Thiran, Latency of wireless sensor networks with uncoordinated power saving mechanisms, in : *Proc. 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc '04)*, Tokyo, Japan, May 24–26, 2004.
- [91] H.-N. Dai, “Throughput and delay in wireless sensor networks using directional antennas,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP '09)*, pp. 421–426, 2009.
- [92] W. Li and H. Dai, “Optimal throughput and energy efficiency for wireless sensor networks : Multiple access and multipacket reception,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 5, issue 4, pp. 541-553, Sep. 2005.

- [93] DE SOUZA, Luciana Moreira Sá, VOGT, Harald, et BEIGL, Michael. A survey on fault tolerance in wireless sensor networks. Sap research, braunschweig, germany, 2007.
- [94] Demirkol, Ilker, Cem Ersoy, and Fatih Alagoz. "MAC protocols for wireless sensor networks : a survey." *Communications Magazine*, IEEE 44.4 (2006) : 115-121.
- [95] Abbasi, Ameer Ahmed, and Mohamed Younis. "A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks." *Computer communications* 30.14 (2007) : 2826-2841.
- [96] N. Ahmed, S. Kanhere, and S. Jha, "Probabilistic coverage in wireless sensor networks," in *Proc. of IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN'05)*, Sydney, Australia, November 2005, pp. 672–681.
- [97] J.N. Al-Karaki, R. Ul-Mustafa, and A.E. Kamal. Data aggregation in wireless sensor networks - exact and approximate algorithms. In *High Performance Switching and Routing*, 2004. HPSR. 2004 Workshop on, pages 241 – 245, 2004.
- [98] J.N. Al-Karaki, R. Ul-Mustafa, and A.E. Kamal. Data aggregation and routing in wireless sensor networks : Optimal and heuristic algorithms. *Computer Networks*, 53(7) :945 – 960, 2009.
- [99] S. Bandyopadhyay and E.J. Coyle. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. In *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*. IEEE Societies, volume 3, pages 1713 – 1723 vol.3, march-3 april 2003.
- [100] V. Geetha, P.V. Kallapur, and S. Tellajeera. Clustering in wireless sensor networks : Performance comparison of leach leach-c protocols using ns2. *Procedia Technology*, 4 :163–170, 2012.
- [101] T.T. Huynh and C.S. Hong. An energy* delay efficient multihop routing scheme for wireless sensor networks. *IEICE transactions on information and systems*, 89(5) :1654–1661, 2006.
- [102] N. Kumar and J. Kaur. Improved leach protocol for wireless sensor networks. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 2011 7th International Conference on, pages 1–5. IEEE, 2011.
- [103] M. Lehsaini, H. Guyennet, and M. Feham. An efficient clusterbased self-organisation algorithm for wireless sensor networks. *International Journal of Sensor Networks*, volume 7 :85–94, March. 2010.

- [104] Y. Li, N. Yu, W. Zhang, W. Zhao, X. You, and M. Daneshmand. Enhancing the performance of leach protocol in wireless sensor networks. In *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2011 IEEE Conference on, pages 223–228, 2011.
- [105] S. Lindsey, C. S. Raghavendra, and M. Sivalingam, Krishna. Data gathering in sensor networks using the energy delay metric. In *Proceedings of the 15th International Parallel Distributed Processing Symposium, IPDPS '01*, pages 188–, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society.
- [106] S. Lindsey and C.S. Raghavendra. Pegasus : Power-efficient gathering in sensor information systems. In *Aerospace Conference Proceedings*, 2002. IEEE, volume 3, pages 3–1125 – 3–1130 vol.3, 2002.
- [107] M. Perillo and W. Heinzelman. Wireless sensor network protocols. *Algorithms and Protocols for Wireless and Mobile Networks*, Eds. A. Boukerche et al., CRC Hall Publishers, 2004.
- [108] G. Ran, H. Zhang, and S. Gong. Improving on leach protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic. *Journal of Information Computational Science*, 7(3) :767–775, 2010.
- [109] M. Khan and J. Misic. On the lifetime of wireless sensor networks. In Y. Zhang, J. Zheng, and H. Hu, editors, *Wireless Networks and Mobile Communications*, volume 6, Boca Raton, FL, 2008. Auerbach Publications, CRC Press.
- [110] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Eredal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks*, 38(4) :393-422, 2002.
- [111] Jae-Hwan Chang and Leandros Tassiulas. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks. In *Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'00)*, volume 1, pages 22-31, Tel-Aviv, Israel, 2000.
- [112] Vivek P. Mhatre, Catherine Rosenberg, Daniel Kofman, Ravi Mazumdar, and Ness Shroff. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4(1) :4-15, January-February 2005.
- [113] Wei Wang, Vikram Srinivasan, and Kee-Chaing Chua. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks. In *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile Computing and networking (MobiCom'05)*, pages 270-283, New York, NY, USA, 2005. ACM.

- [114] Stanislava Soro and Wendi B. Heinzelman. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. In Proceedings of 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05), Denver, Colorado, USA, April 2005.
- [115] Jing Deng, Yung-Hsiang S. Han, Wendi B. Heinzelman, and Pramod K. Varshney. Scheduling sleeping nodes in high density cluster-based sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 10(6) :825-835, 2005.
- [116] Keith Hellman and Michael Colagrosso. Investigating a wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies. *Journal of Interconnection Networks*, 7(1) : 91-99, 2006.
- [117] Manish Bhardwaj and Anantha P. Chandrakasan. Bounding the lifetime of sensor network via optimal role assignments. In Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '02), volume 3, pages 1587-1596, New York, USA, June 2002.
- [118] Di Tian and Nicolas D. Georganas. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), pages 32-41, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [119] Mihaela Cardei, My T. Thai, Yingshu Li, and Weili Wu. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks. In Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'05), volume 3, pages 1976-1984, Miami, USA, March 2005.
- [120] Hai Liu, Peng-Jun Wan, Chih-Wei Yi, Xiaohua Jia, S. A. M. Makki, and Niki Pissinou. Maximal lifetime scheduling in sensor surveillance networks. In Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'05), volume 4, pages 2482-2491, Miami, USA, March 2005.
- [121] Manish Bhardwaj and Anantha Chandrakasan. Upper bounds on the lifetime of wireless sensor networks. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'01), Helsinki, Finland, 2001.
- [122] Honghai Zhang and Jennifer C. Hou. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 1(1-2), 2005.
- [123] Honghai Zhang and Jennifer C. Hou. Maximizing α -lifetime for wireless sensor networks. Proceedings of the 3rd International Workshop on Mea-

- surement, Modeling, and Performance Analysis of Wireless Sensor Networks (SenMetrics'05), 1, 2005.
- [124] Honghai Zhang and Jennifer C. Hou. On the upper bound of α -lifetime for large sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 1(2) :272-300, 2005.
- [125] Kui Wu, Yong Gao, Fulu Li, and Yang Xiao. Lightweight deployment-aware scheduling for wireless sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 10(6) : 837-852, 2005.
- [126] Guoliang Xing, Xiaorui Wang, Yuanfang Zhang, Chenyang Lu, Robert Pless, and Christopher Gill. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 1(1) :36-72, 2005.
- [127] Mihaela Cardei and Jie Wu. Coverage in wireless sensor networks. In Y. Yu, R. Govindan, and D. Estrin, editors, *Handbook of Sensor Networks*. CRC Press, West Palm Beach, FL, 2004.
- [128] Kewei Sha and Weisong Shi. Modeling the lifetime of wireless sensor networks. *Sensor Letters*, 2005.
- [129] Douglas M. Blough and Paolo Santi. Investigating upper bounds on network lifetime extension for cell-based energy conservation techniques in stationary ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile Computing and networking (MobiCom'02)*, pages 183-192, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [130] Santosh Kumar, Anish Arora, and Ten .H. Lai. On the lifetime analysis of always-on wireless sensor network applications. In *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS'05)*, pages 186-188, Washington, DC, USA, November 2005.
- [131] Sameer Tilak, Nael B. Abu-Ghazaleh, and Wendi Heinzelman. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2) :28-36, 2002.
- [132] Jian Li and Prasant Mohapatra. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 3(3) :233-254, 2007.
- [133] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, and Andrea Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks : A survey. *Ad Hoc Networks*, 7(3) :537-568, 2009.

- [134] Trevor Armstrong. Wake-up based power management in multi-hop wireless networks, 2005. Term Survey Paper, University of Toronto, available at <http://www.eecg.toronto.edu/~trevor/Wakeup/index.html>.
- [135] Rong Zheng, Jennifer C. Hou, and Lui Sha. Asynchronous wakeup for ad hoc networks. In Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad Hoc networking & computing (MobiHoc'03), pages 35-45, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [136] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, and Fatih Alagoz. MAC protocols for wireless sensor networks : A survey. IEEE Communications Magazine, 44(4) :115-121, April 2006.
- [137] Koen Langendoen. Medium access control in wireless sensor networks. In Hongyi Wu and Yi Pan, editors, Medium Access Control in Wireless Networks, pages 535-560. Nova Science Publishers, May 2008.
- [138] Wei Ye and John Heidemann. Medium access control in wireless sensor networks. In Krishna Sivalingam Ty Znati C. S. Raghavendra, editor, Wireless Sensor Networks, pages 73-92. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [139] Khaled A. Arisha, Moustafa A. Youssef, and Mohamed F. Younis. Energy-Aware TDMAbased MAC for Sensor Networks. In Proceedings of the IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communications, Computing and Networking (IMPACCT'02), New York City, NY, 2002.
- [140] Jaap C. Haartsen. The bluetooth radio system. IEEE Personal Communications, 7(1) :28-36, February 2000.
- [141] Venkatesh Rajendran, Katia Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks. In Proceedings of the 1st international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys'03) , pages 181-192, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [142] Injong Rhee, Ajit Warrier, Mahesh Aia, Jeongki Min, and Mihail L. Sichitiu. Z-MAC : a hybrid MAC for wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 16(3) :511-524, 2008.
- [143] Giuseppe Anastasi, Eleonora Borgia, Marco Conti, Enrico Gregori, and Andrea Passarella. Understanding the real behavior of mote and 802.11 ad hoc networks : An experimental approach. Pervasive and Mobile Computing, 1(2) :237-256, 2005.
- [144] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In Proceedings of the 2nd international

- conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys'04), pages 95-107, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [145] Tijs van Dam and Koen Langendoen. An adaptive energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In Proceedings of the 1st international conference on embedded networked Sensor Systems (SenSys'03), pages 171-180, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [146] Ieee standard for information technology part 15.4 : Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification for low rate wireless personal area networks (LR-WPANs), 2003.
- [147] Mehmet C. Vuran, Özgür B. Akan, and Ian F. Akyildiz. Spatio-temporal correlation : theory and applications for wireless sensor networks. *Computer Networks*, 45(3) :245-259, 2004.
- [148] Elena Fasolo, Michele Rossi, Jörg Widmer, and Michele Zorzi. In-network aggregation techniques for wireless sensor networks : a survey. *IEEE Wireless Communications*, 14(2) :70-87, April 2007.
- [149] Ian F. Akyildiz, Tommaso Melodia, and Kaushik R. Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 51(4) :921-960, 2007.
- [150] Maarten Ditzel and Frans H. Elferink. Low-power radar for wireless sensor networks. In Proceedings of the 3rd European Radar Conference (EuRAD'06), pages 139-141, Manchester, UK, September 2006.
- [151] Geoffrey Werner-Allen, Konrad Lorincz, Matt Welsh, Omar Marcillo, J. Johnson, Mario Ruiz, and Jonathan Lees. Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE Internet Computing*, 10(2) :18-25, 2006.
- [152] Heinzelman, M. et Perillo, W. *Wireless Sensor Network Protocols*. [éd.] CRC Hall. 2005.
- [153] Seema Bandyopadhyay, Coyle E.J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks. *INFOCOM*. 2003, pp. 1713-1723.
- [154] J.N. Al-Karaki, Kamal A.E. On the Correlated Data Gathering Problem in Wireless Sensor Networks. Ninth IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'04). July 2004, Vol. 1, pp. 226-231.
- [155] Lin H., Chu Y. A clustering technique for large multihop mobile wireless networks. *Vehicular Technology Conference Proceedings*. 2000, Vol. 7, pp. 1545-1549.

- [156] O. Younis, S. Fahmy. Heed : A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 03 (4). 2004, pp. 366-379.
- [157] M. Lehsaini, H. Guyennet, M. Feham. A novel cluster-based self-organization algorithm for wireless sensor networks. *IEEE International Symposium on Collaborative Technologies and Systems (CTS 2008)*. May 2008, pp. 19-26.
- [158] Mohamed, LEHSAINI. Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique. s.l. : UFC, Juillet 2009. Thèse de doctorat.
- [159] M. Lehsaini, H. Guyennet and M. Feham. An Efficient Cluster-based Self-organization Algorithm for Wireless Sensor Networks. *IJSN, International Journal of Sensor Networks*. 2008.
- [160] Q. Fang, F. Zhao, and L. Guibas. Lightweight Sensing and Communication Protocols for Target Enumeration and Aggregation. *4th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MOBIHOC 2003)*. June 2003, pp. 165-176.
- [161] Luo, H., Ye, F., Cheng, J., Lu, S., and Zhang, L. TTDD : two-tier data dissemination in large-scale wireless sensor networks. *Wireless Networks*. January 2005, Vol. 11, pp. 161-175.
- [162] Monique Becker, André-Luc Beylot, Riadh Dhaou, Ashish Gupta, Rahim Kacimi, and Michel Marot. Experimental study : Link quality and deployment issues in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 8th International IFIP-TC6 Networking Conference (NETWORKING'09)*, volume 5550, pages 14-25, Aachen, Germany, 2009. Springer.
- [163] Li Jian and Mohapatra Prasant. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 3(3) :233-254, 2007.
- [164] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Andrea Passarella, and Luciana Pelusi. Mobile-relay forwarding in opportunistic networks. In M. Ibnkahla, editor, *Adaptation and Cross Layer Design in Wireless Networks*. CRC Press, New York, USA, 2008.
- [165] Rahim KACIMI. Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux des capteurs sans fil. Doctorat de l'université de Toulouse, Septembre 2009.
- [166] I. Dietrich, F. Dressler. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, volume 5 (1), pages 1-39, New York, NY, USA, 2009.

- [167] The Network Simulator ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/index.php>.
- [168] Vijay Raghunathan, Saurabh Ganeriwal, and Mani Srivastava. Emerging techniques for long lived wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 44(4) :108-114, April 2006.
- [169] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B. Srivastava. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(2) :40-50, March 2002.
- [170] Verdone, Roberto, Davide Dardari et Gianluca Mazzini Andrea Conti (2008). *Wireless Sensor and Actuator Networks : Technologies, Analysis and Design*. ACADEMIC PRESS.
- [171] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00)*, volume 2, pages 3005-3014, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society.
- [172] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 12(3) :493-506, 2004.
- [173] W.R. Heinzelman, A.P. Chandrakasan , and H. Balakrishnan. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions Wireless Communications*. October 2002, Vol. 1, 4, pp. 660-670.
- [174] Wei Mo, Daji Qiao, and Zhengdao Wang. Mostly-sleeping wireless sensor networks : Connectivity, k-coverage, and alpha-lifetime. In *Proceedings of the the 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, Monticello, IL, USA, 2005.
- [175] X. Li and N. Santoro, «ZONER : A ZONE-based Sensor Relocation Protocol for Mobile Sensor Networks», In *Proc. of the 31st IEEE Conference on Local computer Networks (LCN)*, 2006.
- [176] X. Li, N. Santoro and I. Stojmenovic, «Mesh-Based Sensor Relocation for Coverage Maintenance in Mobile Sensor Networks», In *Proc. of the 4th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC)*, 2007.
- [177] Yunxia Chen and Qing Zhao. On the lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 9(11) :pages 976-978, November 2005.
- [178] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE Inter-*

- national Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01), Rome, Italy, July 2001.
- [179] Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan. Geographical and energyaware routing : a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. In UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001.
- [180] Yick, Jennifer, Biswanath Mukherjee et Dipak Ghosal (2008). Wireless sensor network survey. *Comput. Netw.*, 52(12), 2292–2330.
- [181] Yacine Challal, « Réseaux de Capteurs Sans Fil », Systèmes Intelligents pour le Transport, Université de Technologie de Compiègne, France, Novembre 2008.
- [182] Y. Zou and K. Chakrabarty, “Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks,” *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 61–91, February 2004.
- [183] Y. Zou and K. Chakrabarty “A distributed coverage- and connectivity-centric technique for selecting active nodes in wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 54, no. 8, pp. 978–991, August 2005.
- [184] Zhang, J., Orlik, P. V., Sahinoglu, Z., Molisch, A. F., Kinney, P. (2009). UWB systems for wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, 97(2), 313-331.