

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS DE SÉTIF

M É M O I R E

Présenté à la Faculté des Sciences

Département d'Informatique

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTÈRE

Option : Ingénierie des Systèmes Informatiques

Par

Mohammed Amine MERZOUG

THÈME

**ÉQUILIBRAGE DE CHARGE DANS
LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL**

Soutenu le 28 Juin 2012 devant le jury :

Dr. Allaoua REFOUFI	M.C.	Université de Sétif	Président
Dr. Abdallah BOUKERRAM	M.C.	Université de Sétif	Rapporteur
Dr. Makhlouf ALIOUAT	M.C.	Université de Sétif	Examineur
Dr. Nadjat KAMEL	M.C.	Université de Sétif	Examinatrice

*First and foremost,
I would like to thank Allah,
praised and exalted is He,
for giving me patience
and helping me finish this work.*

Remerciements

J'aimerais tout d'abord adresser mes plus vifs remerciements à mon encadrant, Dr. Abdallah Boukerram, Maître de Conférences à l'Université Ferhat Abbas de Sétif, pour m'avoir proposé ce sujet et pour toute l'aide apportée. La qualité de son encadrement m'a offert une large marge de liberté intellectuelle et scientifique qui m'a permis de mener à bien ce travail de recherche. Je tiens à remercier les membres du jury. Dr. Makhlouf Aliouat et Dr. Nadjat Kamel m'ont fait l'honneur de juger mon travail. Mes remerciements vont également au Dr. Allaoua Refoufi pour l'honneur fait en acceptant de présider ce jury.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à tous mes enseignants. Un grand merci à tous mes collègues de l'École Doctorale STIC, en particulier Fayçal Zaidi, Khalid Ghoul et Lazhar Khamer pour leur soutien et leurs encouragements. Je remercie également les personnes qui m'ont aidé, surtout Dr. Chabane Khentout, Dr. Abdelouahab Moussaoui et Mme Maya Benabdelhafid. Un très grand merci à M. Abdelkader Bouamari, Chef de département d'Informatique.

Je remercie plus particulièrement mon ami Ali Beddiaf pour son aide précieuse, ses encouragements et surtout pour les discussions scientifiques et philosophiques :). Je ne peux pas oublier mes amis : Abdelghani Boubram, Amine Barkat, Fouad Ouzani, Hocine Beroual, Rafik Chinar, Seif Eddine Belbahri et Yazid Chiahi. Mes amis ! Je vous remercie très chaleureusement.

Enfin, j'exprime ma gratitude envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur aide et leur soutien.

*À mes chers parents
pour leur soutien indéfectible,
À mes frères et mes sœurs,
À toute ma famille.*

Table des matières

Remerciements	ii
Table des matières	iv
Table des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Liste des acronymes	ix
Introduction générale	1
Problématique	2
Motivations et contributions	5
Structure du mémoire	7
1 Réseaux de capteurs sans fil	8
1.1 Introduction	8
1.2 Architecture	9
1.2.1 Architecture matérielle	10
1.2.2 Architecture logicielle	14
1.3 Applications	14
1.3.1 Types d'applications	14
1.3.2 Domaines d'application	17
1.4 Contraintes de conception	20
1.4.1 Architecture et taille des nœuds capteurs	21
1.4.2 Scalabilité	21
1.4.3 Coût de production	22
1.4.4 Environnement	22
1.4.5 Déploiement	22
1.4.6 Couverture	24
1.4.7 Média de transmission	25
1.4.8 Durée de vie	25
1.4.9 Tolérance aux pannes	26
1.4.10 Sécurité	27
1.4.11 Qualité de service	27
1.5 Communication	28
1.5.1 Types de communication	28

1.5.2	Pile protocolaire	29
1.6	Énergie	31
1.6.1	Consommation d'énergie	32
1.6.2	Dissipation d'énergie	33
1.6.3	Mécanismes de conservation d'énergie	36
1.7	WSN vs. ad hoc	38
1.8	Conclusion	39
2	Protocoles de communication	41
2.1	Introduction	41
2.2	Contraintes de conception des protocoles de communication	41
2.2.1	Énergie	42
2.2.2	Calcul	43
2.2.3	Communication	43
2.2.4	Scalabilité	43
2.3	Protocoles d'accès au canal	44
2.3.1	Protocoles MAC sans contention	44
2.3.2	Protocoles MAC avec contention	45
2.3.3	Protocoles hybrides	45
2.4	Protocoles de Routage	46
2.4.1	Protocoles de routage à plat	47
2.4.2	Protocoles de routage hiérarchiques	49
2.4.3	Protocoles de routage basés sur la localisation	50
2.5	Conclusion	51
3	Clustering et équilibrage de charge	52
3.1	Introduction	52
3.2	Clustering	52
3.3	Classification des algorithmes de clustering	54
3.4	Équilibrage de charge	55
3.4.1	Élection des cluster-heads	56
3.4.2	Nombre de clusters	56
3.4.3	Position des cluster-heads	56
3.4.4	Taille des clusters	57
3.4.5	Routage multi-chemins	57
3.4.6	Rotation des cluster-heads	57
3.5	Algorithmes de clustering	58
3.5.1	LEACH	58
3.5.2	TEEN	61
3.5.3	PEGASIS	62
3.5.4	EEHC	62
3.5.5	HEED	62
3.5.6	DWEHC	63
3.5.7	EESH	63
3.6	Conclusion	64

4	Protocole de communication hiérarchique	65
4.1	Introduction	65
4.2	Protocole de routage hiérarchique	65
4.3	Détails du protocole proposé	67
4.3.1	Phase d'initialisation	68
4.3.2	Phase de clustering	71
4.3.3	Phase de transmission de données	74
4.4	Pourquoi le simulateur OMNeT++/Castalia ?	75
4.5	Présentation d'OMNeT++/Castalia	75
4.6	Structure d'un réseau de capteurs sans fil dans Castalia	77
4.7	Modèles de consommation d'énergie par la radio	80
4.7.1	Modèle de consommation théorique	80
4.7.2	Modèle de consommation de Castalia	82
4.8	Ajustement de la puissance de transmission	83
4.9	Simulation et analyses de performances	85
4.9.1	Configuration de l'environnement de simulation	86
4.9.2	Résultats de simulation	87
4.10	Conclusion	94
	Conclusion et perspectives	95
	Bibliographie	96

Table des figures

1.1	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil	10
1.2	Architecture d'un nœud capteur	11
1.3	Types d'applications. Application orientée événement (a). Application orientée temps (b). Application orientée requête (c)	15
1.4	Rayons de détection et de communication d'un nœud capteur	24
1.5	Pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil	30
1.6	Problème du nœud caché	35
1.7	Mécanisme RTS-CTS	36
2.1	Communication de données dans un réseau de capteurs sans fil	47
4.1	Fonctionnement du protocole proposé	68
4.2	Phase d'initialisation. Détermination des niveaux et échange d'informations. La station de base (BS) diffuse un message aux nœuds du 1-saut (a). Un nœud capteur du 1-saut diffuse un message à ses voisins (b). Structure en couches (c)	69
4.3	Phase d'initialisation. Attribution de votes et calcul de poids (exemple de quatre nœuds capteurs)	71
4.4	Phase de transmission de données	74
4.5	Structure d'un réseau de capteurs sans fil dans Castalia	77
4.6	Structure d'un nœud capteur dans Castalia	78
4.7	Modèle théorique de consommation d'énergie par la radio	81
4.8	100 nœuds capteurs déployés aléatoirement dans une zone de 100×100 mètres	87
4.9	Consommation d'énergie	88
4.10	Énergie moyenne consommée par round	89
4.11	Durée de vie du réseau lorsque le premier nœud capteur meurt	90
4.12	Durée de vie du réseau lorsque 50% des nœuds capteurs meurent	90
4.13	Durée de vie du réseau lorsque 80% des nœuds capteurs meurent	91
4.14	Durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds lorsque le premier nœud meurt	92
4.15	Nombre de nœuds capteurs vivants pour un réseau de 100 nœuds	93
4.16	Nombre de messages de données reçus par la station de base	93

Liste des tableaux

1.1	Énergie de communication du capteur Mica2	34
4.1	Caractéristiques de la radio	81
4.2	Énergie consommée dans le mode transmit par la radio CC2420	82
4.3	Énergie consommée dans le mode receive/listen et sleep par la radio CC2420	82
4.4	Délais de transitions entre les états de la radio CC2420 (Transitions des états de colonnes vers les lignes en <i>ms</i>)	83
4.5	Énergies de transitions entre les états de la radio CC2420 (Transitions des états de colonnes vers les lignes en <i>mW</i>)	83
4.6	Paramètres de simulation	88

Liste des acronymes

ADC	Analog-to-Digital Converter	11
BS	Base Station	15
CCA	Channel Clear Assessment	79
CDMA	Code Division Multiple Access	44, 45
CH	Cluster-head	68
CSMA	Carrier Sense Multiple Access	45
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	41, 45, 72, 74, 76, 79
CTS	Clear To Send	36
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency	17
DSN	Distributed Sensor Network	17
DWEHC	Distributed Weight-based Energy-Efficient Hierarchical Clustering	63
EEHC	Energy-Efficient Hierarchical Clustering	62
EESH	Energy-Efficient Strong Head clustering	63
FDMA	Frequency Division Multiple Access	44, 45
GPS	Global Positioning System	13, 50, 51, 86
GSM	Global System for Mobile communications	1
HEED	Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering	62, 63
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	76, 79

LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy	58, 59, 61, 85, 88, 89, 91, 92, 94
LEACH-C	LEACH-centralized	61
MAC	Media Access Control	7, 30, 34, 35, 37, 38, 41, 44, 45, 51, 72, 74, 76, 78, 79
MANET	Mobile Ad-hoc NETworks	39
MCU	Micro Controller Unit	33
NED	Network Description	78, 96
NesC	Network embedded systems C	14
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed in C++	75–78, 85, 94, 96
PDA	Personal Digital Assistant	1
PEGASIS	Power-Efficient GAttering in Sensor Informa- tion Systems	62
QoS	Quality of Service	39, 51
RAM	Random Access Memory	12
RCSF	Réseau de Capteurs Sans Fil	9
ROM	Read-Only Memory	12
RSSI	Received Signal Strength Indicator	59, 72, 91
RTS	Request To Send	36
S-MAC	Sensor MAC	76, 79
SOSUS	Sound Surveillance System	17
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotia- tion	48
SQL	Structured Query Language	17
T-MAC	Timeout MAC	76, 79

TDMA	Time Division Multiple Access	41, 44, 45, 59, 68, 73
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol	61
Wi-Fi	Wireless-Fidelity	1
WSN	Wireless Sensor Network	9

Introduction générale

Depuis leur création, les réseaux sans fil ont connu un succès énorme grâce à leurs nombreux avantages comme la facilité de déploiement et le coût réduit d'installation. Premièrement, en fonction de la connectivité, les appareils sans fil peuvent être placés pratiquement n'importe où, puisqu'il n'y a plus de contrainte d'installation de câbles. Deuxièmement, des économies sur les coûts en raison de la suppression du câblage. Les réseaux sans fil sont géographiquement étendus ([GSM](#)), locaux ([Wi-Fi](#)) ou personnels ([Bluetooth](#)). Ces réseaux sont devenus très populaires et les dispositifs mobiles sont de plus en plus nombreux ([PDA](#), laptops, etc.), de plus en plus petits et ont des capacités de calcul de plus en plus performantes. On les rencontre partout dans notre quotidien : à la maison, au bureau, ... Ces dernières années, un nouveau type de réseaux sans fil est apparu. Les avancées technologiques dans différents domaines comme l'électronique et les communications sans fil ont permis le développement de capteurs sans fil, de très petite taille, capables de détecter des conditions ambiantes telles que la température, le son, la lumière, le mouvement, etc. Ces capteurs sont dotés de capacités de traitement de données et de communication sans fil. Chaque capteur peut mesurer des paramètres de l'environnement physique entourant, les transformer en un signal électrique, effectuer des calculs simples et envoyer les informations collectées aux parties intéressées. Ce développement technologique a conduit à l'idée des réseaux de capteurs sans fil. Un ensemble de capteurs sans fil dispersés dans une zone d'intérêt pour surveiller et fournir des informations utiles.

Les réseaux de capteurs sans fil représentent une amélioration significative par rapport aux capteurs traditionnels qui sont reliés à la base de traitement par des liaisons filaires. Les réseaux de capteurs sans fil facilitent une série d'applications irréalisables ou trop chères il y a quelques années. Les capteurs sans fil peuvent être déployés rapidement et fonctionner de manière autonome dans des environnements où la surveillance de l'homme est risquée, inefficace ou parfois impossible. Afin de détecter une variété de phénomènes physiques, des capteurs sans fil minuscules peuvent être éparpillés sur des routes, des structures ou des murs, à l'intérieur de grosses machines, au fond d'un océan, dans un champ contaminé chimiquement ou biologiquement, dans un champ de bataille au-delà

des lignes ennemies, dans une maison ou un grand bâtiment, etc. Les caractéristiques décrites ci-dessus assurent un large éventail d'applications pour les réseaux de capteurs sans fil. De nombreux domaines d'application sont alors envisagés tels que le domaine militaire, l'environnement, la détection et la surveillance des désastres, la médecine et la santé, la domotique, l'agriculture de précision, la surveillance et la maintenance préventive des machines, la logistique et les transports intelligents. Dans le domaine militaire, les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés pour surveiller le déplacement de troupes ennemies dans un espace donné ou récolter des données dans une zone dangereuse où l'envoi d'êtres humains serait à risque. Dans le domaine de l'environnement, des nœuds capteurs dispersés dans la nature, peuvent signaler des événements tels que les feux de forêts, les tempêtes et les inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours. Dans le domaine de la santé, les nœuds capteurs peuvent être également déployés pour surveiller les patients et aider les patients handicapés. Quelques autres applications comme la gestion des stocks, la surveillance de la qualité des produits et la surveillance des zones sinistrées, etc.

Problématique

Un capteur sans fil est un petit dispositif qui comprend quatre composants de base : une unité d'acquisition de données de l'environnement physique entourant, une unité de traitement et de stockage de données, une unité de communication sans fil pour la transmission de données et une unité d'énergie. Le capteur sans fil, étant un petit appareil micro-électronique alimenté par batteries, ne peut être équipé qu'avec une source d'énergie limitée adaptée à sa petite taille. Ce qui limite la capacité du capteur sans fil en termes de calcul, de stockage et de transmission. Un réseau de capteurs sans fil est composé d'un grand nombre de nœuds capteurs, avec des ressources énergétiques limitées, distribués dans une zone donnée et une station de base, beaucoup plus puissante que les nœuds capteurs, située généralement à l'extrémité de la zone d'intérêt. Les nœuds capteurs collectent des données de l'environnement entourant et les rapportent à la station de base. Par exemple, Les nœuds capteurs peuvent surveiller certains événements, comme le mouvement, l'intrusion ou le passage d'objets ou de personnes, et rapporter ces événements lorsque ceux-ci ont lieu. Le rôle de la station de base consiste à collecter les informations envoyées par les nœuds capteurs et les renvoyer à l'utilisateur et, éventuellement, adresser des requêtes aux nœuds capteurs. Compte tenu de la vaste zone à couvrir, la courte durée de vie des nœuds capteurs et la possibilité d'avoir des nœuds endommagés, un grand nombre de nœuds capteurs devrait être déployé. Des centaines à plusieurs milliers de nœuds sont densément déployés dans la zone d'intérêt. Un réseau de capteurs sans

fil travaille généralement sans surveillance dans des zones géographiques distantes ou inaccessibles. En raison des conditions défavorables, les nœuds capteurs sont généralement déployés à distance de manière aléatoire. Dans de telles conditions, les batteries des nœuds capteurs ne peuvent pas être ni rechargées ni remplacées. De ce fait, les nœuds capteurs sont jetables et devraient durer jusqu'à ce que leurs énergies s'épuisent. La durée de vie du nœud capteur, par conséquent, montre une forte dépendance sur la durée de vie de la batterie. La conservation de l'énergie des nœuds capteurs et le maintien du réseau fonctionnel le plus longtemps possible sont donc des défis importants qui n'étaient pas posés par les réseaux sans fil classiques, ni même par les réseaux ad hoc. Tous les mécanismes, algorithmes et protocoles valables pour les réseaux sans fil classiques, ou les réseaux ad hoc, ne sont pas donc adaptés à cette contrainte énergétique, propre aux réseaux de capteurs sans fil. Comme l'énergie est la ressource la plus précieuse pour les réseaux de capteurs sans fil, la consommation d'énergie est la contrainte la plus importante pendant la conception d'un réseau de capteurs sans fil.

Un des problèmes principaux dans les réseaux de capteurs sans fil est comment envoyer les informations collectées à la station de base d'une façon économe en énergie comme le nombre de nœuds capteurs est très grand et l'énergie de ces nœuds est limitée ?

Une première solution consiste à utiliser un protocole de communication directe où les nœuds capteurs envoient directement leurs données à la station de base. Dans ce cas les nœuds capteurs situés plus loin de la station de base vont avoir une charge très élevée due à la communication longue distance. En effet, pour qu'un nœud ait une portée de transmission suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant et donc une énergie consommée importante. Les nœuds capteurs les plus éloignés de la station de base vont consommer plus d'énergie pour transmettre des données que les autres nœuds et donc meurent plus tôt. L'énergie des nœuds capteurs ne supportent pas les communications à longue distance pour atteindre la station de base distante. À cause de leur limitation en énergie, et parce que la transmission des données est une tâche qui exige une consommation énergétique relativement importante par rapport aux tâches d'acquisition et de traitement, les nœuds capteurs disposent d'une portée de transmission généralement faible, limitée à quelques mètres. La portée de transmission limitée des nœuds capteurs et l'éloignement de la station de base peut rendre parfois la transmission directe une solution impossible.

Une deuxième solution consiste à utiliser une architecture de communication multi-sauts ou passerelles pour transmettre les données où chaque nœud joue le double rôle

de source et routeur de données. Pour envoyer les données à la station de base éloignée, un nœud capteur collabore avec d'autres nœuds qui se chargent de l'acheminement des données vers la station de base. Les données perçues par un nœud capteur sont, donc, acheminées de voisin en voisin jusqu'à atteindre la station de base. Dans ce cas, l'envoi des données par les différents nœuds capteurs du réseau doit obéir à un protocole de routage. Les nœuds capteurs doivent envoyer leurs données et, dans certains cas, router les données provenant de leurs voisins, ce qui leur fait consommer encore plus d'énergie. Le protocole de routage doit garantir l'acheminement des données capturées vers la station de base tout en réduisant la consommation d'énergie induite par les transmissions. Plusieurs protocoles ont été proposés dans la littérature. Certains proposent de prendre le chemin le plus court, en termes de distance vers la station de base. D'autres, se basent sur le niveau d'énergie dans les nœuds tout au long du chemin en privilégiant les nœuds ayant des quantités d'énergie maximales. D'autres encore, choisissent un chemin optimal en privilégiant les nœuds dont la présence dans le chemin permet de consommer moins d'énergie. Dans le cas où le nombre de nœuds est très grand le nombre de paquets générés sera énorme. Pour éviter un trop grand volume de données acheminées des nœuds vers la station de base, certains nœuds peuvent agréger/fusionner les données provenant de plusieurs voisins avant de router l'information vers la station de base. Lorsque les nœuds capteurs utilisent une architecture multi-sauts pour atteindre la station de base, les nœuds capteurs situés près de la station de base vont avoir une charge supplémentaire pour relayer les paquets parce que la plupart du trafic sera routé à travers eux. Par conséquent, ces nœuds capteurs vont consommer plus d'énergie que les autres nœuds et meurent plus tôt. En plus, cette technique a un surcoût dû à la découverte de la route et la recherche des sauts optimaux pour communiquer avec la station de base. L'utilisation fréquente du même chemin optimal induit l'épuisement de la batterie des nœuds qui constituent ce chemin. Afin de résoudre ce problème et équilibrer la consommation d'énergie, plusieurs solutions ont été proposées, telles que les algorithmes de routage multi-chemins, qui permettent de distribuer le trafic sur plusieurs chemins différents.

La troisième solution est le clustering. Afin d'équilibrer la consommation d'énergie et assurer une longévité maximale du réseau de capteurs sans fil, le regroupement de nœuds capteurs en clusters (grappes) a été largement étudié par la communauté de recherche. Chaque cluster a un leader, appelé cluster-head (tête de grappe). Chaque nœud capteur appartient à un seul cluster et communique avec la station de base seulement via son cluster-head. Ainsi, le trafic de données généré à chaque nœud capteur peut être envoyé via les cluster-heads à la station de base suite à une transmission directe ou via une communication multi-sauts entre les cluster-heads. En utilisant un protocole basé sur

le clustering pour transmettre les données à la station de base, la plupart des nœuds capteurs transmettent sur de petites distances en envoyant les données collectées aux cluster-heads, ce qui veut dire que seulement quelques nœuds i.e. les cluster-heads doivent transmettent sur de longues distances pour atteindre la station de base. Le clustering donne de meilleurs résultats, il réduit la consommation d'énergie, améliore la durée de vie et la scalabilité du réseau de capteurs sans fil. C'est pourquoi nous avons retenu cette solution. Le problème est comment créer cette structure organisationnelle entre les nœuds capteurs ? Récemment, de nombreux algorithmes de clustering ont été spécifiquement conçus pour les réseaux de capteurs sans fil. Le clustering est défini comme le processus de choix d'un ensemble de nœuds capteurs sans fil pour être cluster-head pour un réseau de capteurs sans fil donné. La sélection d'un cluster-head peut être faite selon différents critères, à titre d'exemple selon l'énergie des nœuds capteurs, selon le degré de connectivité ou aléatoirement. Par exemple, des nœuds ayant plus d'énergie peuvent être utilisés pour traiter et envoyer des informations, tandis que des nœuds de plus faible énergie peuvent capturer les informations. Ensuite, ces cluster-heads groupent les nœuds capteurs pour former des clusters. Le choix d'un nœud capteur à ressource énergétique limitée pour agir comme un élément de traitement et de relais pour le cluster épuiserait rapidement son énergie. Donc, si les cluster-heads ne sont pas des nœuds riches en ressources et ont été choisis a priori et fixés tout au long de la durée de vie du réseau, comme dans le cas des algorithmes de clustering statique, il est facile de voir que les nœuds capteurs choisis pour être cluster-heads mourraient rapidement, ce qui termine la vie utile de tous les nœuds appartenant à ces clusters. Pour équilibrer la consommation d'énergie entre les nœuds capteurs, certaines approches proposées tournent le rôle de cluster-head entre les nœuds capteurs du même cluster ou du réseau en entier, en se basant sur différentes stratégies. De plus, le système peut avoir des clusters à haute densité et des clusters à très faible densité. Dans de tels scénarios le cluster-head à haute densité sera accablé avec la charge de traitement et de communication et consomme son énergie rapidement, tandis que le cluster-head à faible densité reste inoccupé et gaspille un temps précieux. Par conséquent, les algorithmes de clustering doivent équilibrer la charge entre les cluster-heads en formant des clusters de même densité.

Motivations et contributions

Les caractéristiques uniques des réseaux de capteurs sans fil leur permettent d'envahir plusieurs domaines d'applications. Ces réseaux se révèlent très utiles dans de nombreuses applications militaires et civiles lorsqu'il s'agit de collecter et de traiter des informations provenant de l'environnement. Néanmoins, avant d'atteindre la phase d'implantation

industrielle à grande échelle des réseaux de capteurs sans fil, beaucoup de problèmes restent encore à traiter et beaucoup de solutions proposées dans la recherche demeurent encore à améliorer, telles que les solutions proposées aux problèmes d'optimisation de l'énergie dépensée, de routage de données, de sécurité, d'auto-organisation en cas de perte de nœuds, d'agrégation et de fusion de données, d'interrogation du réseau et de collecte de données, etc. Parmi ces problèmes, la minimisation de l'énergie dissipée et la maximisation de la durée de vie du réseau sont sans doute ceux qui ont suscité le plus d'intérêt dans la recherche.

Notre travail entre dans le cadre de l'étude du problème de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Le souci principal est de prolonger la vie du système en économisant l'énergie dépensée par chaque nœud capteur du réseau. En effet, pour qu'un réseau de capteurs sans fil ait une longévité maximale et afin de maintenir le réseau fonctionnel aussi longtemps que possible, les protocoles conçus pour les réseaux de capteurs sans fil doivent judicieusement utiliser les ressources énergétiques limitées. Plusieurs protocoles de routage ont été proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Les protocoles de routage à plat ne se comportent pas de façon optimale surtout lorsque la taille du réseau devient plus importante. Pour résoudre ce problème, le regroupement de nœuds en clusters a été proposé. Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés aux protocoles basés sur le clustering et à l'équilibrage de charge. Nous présentons un état de l'art des différentes techniques de clustering proposées jusqu'à présent pour les réseaux de capteurs sans fil. Notre objectif est de fournir une meilleure compréhension de ce problème de recherche actuel dans ce domaine émergent.

La plupart des protocoles hiérarchiques n'adressent que le routage à un seul saut des cluster-heads à la station de base. En effet, ils supposent que les cluster-heads peuvent communiquer directement avec la station de base. Cela devient impossible quand l'étendue du réseau augmente. Notre travail consiste à proposer un protocole de routage hiérarchique à plusieurs sauts pour remédier à ce problème. Un protocole de communication parfait consomme l'énergie des nœuds capteurs lentement et équitablement. En d'autres termes, les nœuds meurent à peu près au même moment en évitant l'épuisement rapide et déséquilibré de l'énergie des nœuds capteurs. Notre objectif est de proposer un protocole qui équilibre la charge et assure la plus grande longévité possible d'un réseau de capteurs sans fil.

Structure du mémoire

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres suivis d'une conclusion générale.

- Le chapitre 1 représente une introduction aux réseaux de capteurs sans fil. Dans ce chapitre, nous étudions les réseaux de capteurs sans fil. Nous commençons par la description de l'architecture d'un réseau de capteurs ainsi que celle d'un nœud capteur. Nous discutons ensuite les types d'application, les domaines d'application, les contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fil ainsi que la communication et la consommation d'énergie dans ce type de réseaux. Enfin, nous présentons les différences entre les réseaux de capteurs sans fil et les réseaux ad hoc.
- Le chapitre 2 étudie les protocoles de communication. Dans un premier temps, nous discutons les contraintes de conception des protocoles de communication pour les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, nous présentons les types de protocoles [MAC](#) proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Ces protocoles [MAC](#) sont regroupés en trois familles : les protocoles sans contention, les protocoles avec contention et les protocoles hybrides qui combinent les deux autres solutions. Nous discutons aussi les avantages et les inconvénients de l'utilisation de chacune de ces approches. Enfin, nous présentons une classification des protocoles de routage proposés pour les réseaux de capteurs sans fil.
- Dans le chapitre 3, nous discutons la problématique de clustering et d'équilibrage de charge dans le domaine des réseaux de capteurs. Après avoir expliqué le principe de clustering nous présentons une classification générale des algorithmes de clustering proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Par la suite, nous présentons le problème d'équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs sans fil qui a des exigences uniques le distinguent du problème classique d'équilibrage de charge. Enfin, nous étudions différents algorithmes de clustering tout en indiquant leurs objectifs, leurs caractéristiques et leurs faiblesses.
- Le chapitre 4 détaille notre contribution et les résultats de son évaluation de performance. Pour commencer, nous décrivons le simulateur que nous avons choisi. Ensuite, nous présentons notre approche de routage hiérarchique et nous analysons les résultats de simulations. Plusieurs séries de résultats obtenues par simulation sont présentées. Ces résultats soulignent l'importance de l'équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs sans fil et les améliorations apportées par notre contribution.
- Enfin, une conclusion résume notre contribution et présente quelques pistes de recherche futures.

Chapitre 1

Réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Les capteurs traditionnels, mesurant une grandeur physique, sont présents depuis longtemps dans différents domaines comme l'industrie, l'aéronautique ou l'automobile. Ils sont en général reliés à la base de traitement par des liaisons filaires. Le câblage a comme principaux défauts d'être coûteux, encombrant et dans certaines situations il constitue un vrai handicap au niveau du poids comme dans un navire ou un sous-marin. La mise en place du câblage est parfois impossible par exemple en cas de présence d'unités mobiles. Les progrès réalisés ces dernières décennies dans les domaines de la microélectronique, de la micromécanique et des technologies de communication sans fil ont permis le développement de capteurs sans fil. Le passage du filaire au sans fil permet une plus grande flexibilité au niveau de déploiement. Le déploiement de plusieurs capteurs sans fil, en vue de collecter et transmettre des données environnementales vers un ou plusieurs points de collecte, d'une manière autonome, forme un réseau de capteurs sans fil.

L'émergence des réseaux de capteurs (et d'actionneurs) sans fil ouvre la voie au déploiement de nouvelles applications de surveillance (et de contrôle-commande) des grands systèmes, notamment ceux qui s'étendent sur de vastes étendues géographiques et qui requièrent une instrumentation à grande échelle. Les réseaux de capteurs sans fil capables de s'auto-configurer et se gérer sans qu'il y ait besoin d'interventions humaines, fournissent une solution facile et à bas prix pour les applications de collecte d'informations particulièrement dans les zones à conditions difficiles où les approches classiques sont très coûteuses ou impossibles. Selon le magazine Technology Review du MIT¹, il s'agit de l'une des dix nouvelles technologies qui bouleverseront le monde et notre manière de vivre et de travailler.

1. "10 Emerging Technologies That Will Change the World", Technology Review February 2003 (<http://www.technologyreview.com>)

Ce premier chapitre représente une introduction aux réseaux de capteurs sans fil. Dans ce chapitre, nous allons discuter l'architecture des réseaux de capteurs sans fil, leurs domaines d'application, les contraintes de conception, la communication et la consommation d'énergie ainsi que les différences entre ces réseaux et les réseaux ad hoc.

1.2 Architecture

Un réseau de capteurs sans fil (**RCSF**), en Anglais wireless sensor network (**WSN**), est constitué d'un ensemble de nœuds capteurs (sensor nodes) répartis dans une zone donnée pour surveiller des phénomènes divers et une ou plusieurs stations de base, appelées aussi puits (sink) ou passerelles, situées généralement à l'extrémité de la zone d'intérêt. Les nœuds capteurs sont des dispositifs électroniques de petite taille alimentés par batterie. La position de ces nœuds capteurs n'est pas obligatoirement prédéterminée. Les nœuds capteurs peuvent être dispersés aléatoirement à travers la zone d'intérêt. La station de base représente le point de collecte de données capturées. Les nœuds capteurs collectent les données et les envoient à la station de base directement ou via un chemin multi-sauts formé d'autres nœuds capteurs. La station de base transmet ces données par Internet, par satellite, ... à l'utilisateur (nœud de commande) pour analyse et, éventuellement, prise de décisions. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base pour transmettre ses requêtes aux nœuds capteurs et récolter les données environnementales captées par le biais de la station de base. Les réseaux de capteurs sans fil sont généralement considérés comme un type particulier des réseaux ad hoc. Dans un réseau de capteurs sans fil, les nœuds capteurs doivent être en mesure de s'organiser entre eux pour former le réseau sans l'aide d'une infrastructure fixe définie à l'avance, ni d'une intervention humaine. Cependant, la plupart des protocoles développés pour les réseaux ad hoc ne s'appliquent pas aux réseaux de capteurs sans fil. Dans les sections suivantes nous allons voir pourquoi.

La Figure 1.1 montre un réseau de capteurs sans fil composé d'un ensemble de nœuds capteurs et un seul nœud puits (station de base). Les nœuds capteurs sont déployés de manière aléatoire dans la zone d'intérêt. La station de base est située à l'extrémité de cette zone pour récupérer les données collectées par les nœuds capteurs. Lorsqu'un nœud capteur détecte un événement pertinent, un message d'alerte est envoyé à la station de base par le biais d'une communication multi-sauts.

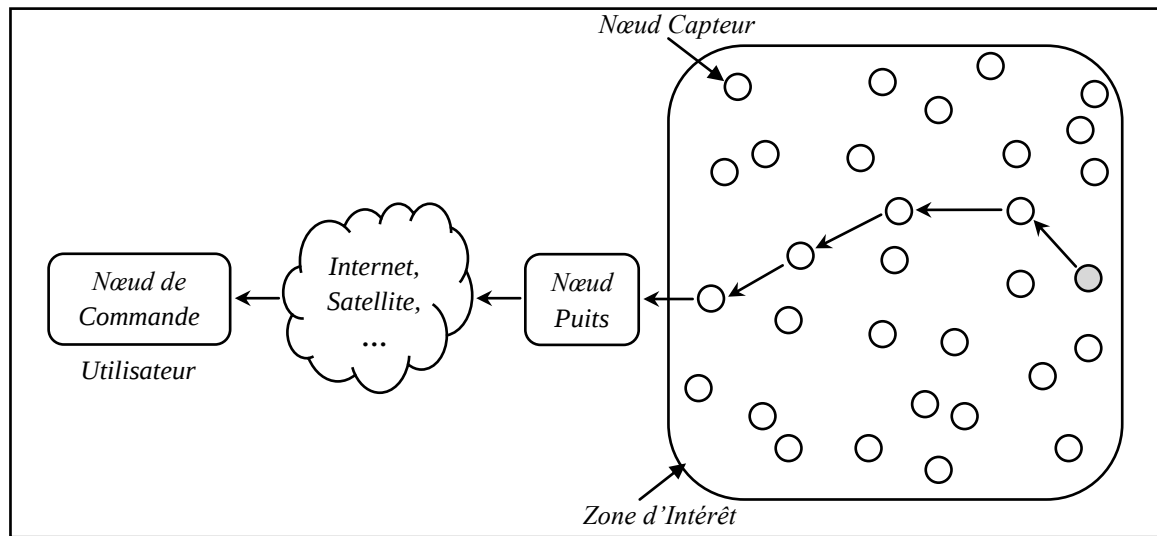


FIGURE 1.1 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

1.2.1 Architecture matérielle

Dans un réseau de capteurs sans fil, il y a deux types de nœuds : les nœuds capteurs (source de données) et les nœuds puits (destination de données), appelés aussi stations de base.

1.2.1.1 Nœud capteur

Un nœud capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer des grandeurs physiques comme la température, la lumière, la pression, etc. et les envoyer à une station de base. Un nœud capteur typique se compose de quatre unités de base (Figure 1.2) [6] : une unité d'acquisition chargée de capter des grandeurs physiques de l'environnement entourant (température, humidité, pression, vibrations, son, image, ...) et les transformer en grandeurs numériques, une unité de traitement et de stockage de données, une unité de communication sans fil et une unité d'énergie. Un nœud capteur pourrait également avoir des unités supplémentaires, dépendant de l'application pour laquelle il a été conçu, comme un générateur d'énergie, un système de localisation et un mobilisateur chargé de déplacer le nœud capteur en cas de nécessité.

Les nœuds capteurs sont très limités en termes de ressources. Les nœuds capteurs sont de véritables systèmes embarqués. La principale caractéristique d'un nœud capteur sans fil est sa petite taille. Depuis que les premiers nœuds capteurs sans fil sont apparus, la tendance est à la miniaturisation. A cause de la taille réduite, la ressource énergétique dont un nœud capteur dispose est limitée. Une deuxième caractéristique, évidente mais

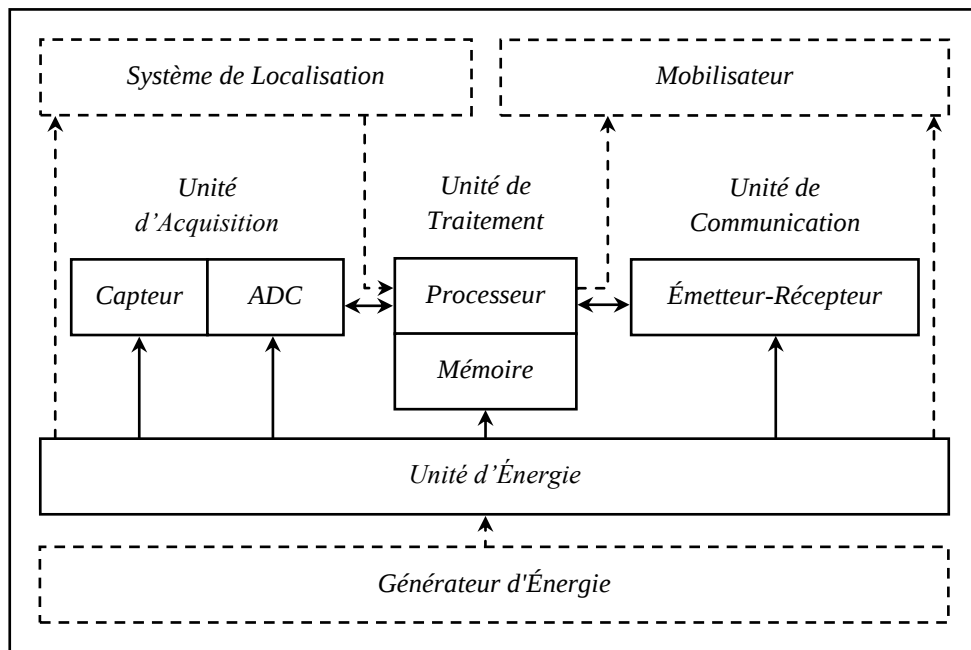


FIGURE 1.2 – Architecture d'un nœud capteur

essentielle, est l'autonomie du point de vue source d'énergie et fonctionnement. Ces deux particularités induisent plusieurs autres caractéristiques à considérer, en particulier la capacité de calcul, de stockage et de transmission. Des performances élevées en termes de capacités de traitement et de transmission impliquent une consommation d'énergie élevée. De manière générale, il est souhaitable que la durée de vie de la batterie des nœuds capteurs soit la plus grande possible, donc les différentes unités qui composent un nœud capteur sont généralement très limitées en termes de ressources et de performance pour que leur consommation d'énergie soit extrêmement faible.

a. Unité d'acquisition l'unité d'acquisition de données est composée de deux sous-unités : un capteur et un convertisseur analogique-numérique ([ADC](#)¹). Un capteur est un dispositif qui permet de mesurer ou détecter des paramètres de l'environnement physique entourant, comme le mouvement, la chaleur ou la lumière. Un capteur est capable de détecter un événement si ce dernier a lieu dans son rayon de détection ou rayon de couverture. Les capteurs peuvent être de différents types par exemple des capteurs de position, de pression, de mouvement, de luminosité, de température, ... ou des capteurs plus complexes comme des capteurs de son ou d'images. À titre d'exemple, un capteur est un thermomètre dans le cas de données thermiques, une caméra dans le cas de signaux vidéo. Un nœud peut être doté d'un ou plusieurs capteurs. Les signaux analogiques produits

1. ADC : Analog-to-Digital Converter

par le capteur, basés sur le phénomène observé, sont convertis en signaux numériques par le convertisseur analogique-numérique, pour être traités par l'unité de traitement.

b. Unité de traitement l'unité de traitement comprend un microcontrôleur dédié et de la mémoire et fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les capteurs sans fil par exemple TinyOS¹. Cette unité fournit aux nœuds capteurs la capacité de stocker, exécuter des calculs et analyser les données captées pour alléger la tâche de la station de base. Cette unité est chargée aussi d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le nœud capteur avec d'autres nœuds capteurs. Outre le traitement des données, le microcontrôleur commande également toutes les autres unités notamment l'unité de communication. L'unité de traitement possède deux interfaces, une interface pour l'unité d'acquisition et une interface pour l'unité de communication. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de communication.

Étant donné que la consommation des microcontrôleurs est proportionnelle à leur fréquence de fonctionnement, les microcontrôleurs utilisés pour les nœuds capteurs sont à faible consommation d'énergie. Leurs fréquences sont assez faibles, moins de 10 MHz pour une consommation de l'ordre de 1 mW. Une autre caractéristique est la taille de leur mémoire qui est de l'ordre de 10 Ko de RAM pour les données et de 10 Ko de ROM pour les programmes [6]. Cette mémoire consomme la majeure partie de l'énergie allouée au microcontrôleur, c'est pourquoi on lui adjoint souvent de la mémoire flash moins coûteuse en énergie.

c. Unité de communication l'unité de communication sans fil connecte le nœud capteur au réseau. Cette unité est responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions des données sur un medium sans fil. Le mode de communication inter-nœuds pourrait être optique (infrarouge), mais la communication radio reste la plus pratique car elle supporte les obstacles physiques. Les composants utilisés pour réaliser la transmission sont des composants classiques. Ainsi on retrouve les mêmes problèmes que dans tous les réseaux sans fil : la quantité d'énergie nécessaire à la transmission augmente avec la distance. En effet, pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant. Par conséquent, l'énergie consommée serait importante. L'autre alternative serait d'utiliser de longues antennes, mais ceci n'est pas possible à cause de la taille réduite des nœuds capteurs. Pour augmenter la distance tout en préservant l'énergie, les réseaux de capteurs utilisent le routage multi-sauts.

1. <http://www.tinyos.net>

d. Unité d'énergie comme il est souhaitable de s'affranchir de toute connexion par câble, le nœud capteur doit disposer de sa propre source d'énergie qui alimente le reste des unités. L'unité d'énergie est une unité très importante pour un nœud capteur. Elle stocke l'énergie et la fournit sous la forme requise. Le stockage de l'énergie se fait traditionnellement en utilisant des batteries standard de basse tension. À titre d'exemple, une pile AA normale d'environ $2.2 - 2.5Ah$ fonctionnant à $1.5V$ [30]. De petite taille, la batterie fournit donc une quantité d'énergie très limitée. Dès lors, l'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, puisqu'elle influe directement sur la durée de vie du nœud capteur et du réseau en entier.

e. Générateur d'énergie s'il est nécessaire qu'un nœud capteur soit maintenu en activité pendant une très longue période de temps, un générateur d'énergie, tel que des cellules solaires, serait utile afin de tenir le nœud alimenté électriquement sans avoir à changer ses batteries.

f. Système de localisation certaines applications des réseaux de capteurs sans fil nécessitent la connaissance de la localisation des nœuds capteurs avec une grande précision. Dans ces applications, les opérations de captage ou les algorithmes de routage requièrent la connaissance de la localisation des nœuds, car ces derniers sont déployés d'une manière aléatoire et fonctionnent d'une façon autonome. Ceci rend l'intégration d'un système de localisation, très commune dans les nœuds capteurs. Un système de localisation, par exemple un récepteur [GPS](#), permet au nœud capteur d'identifier sa position géographique.

g. Mobilisateur certaines applications pourraient avoir besoin de nœuds capteurs équipés d'un mobilisateur pour qu'ils puissent se déplacer quand il est nécessaire. Ce qui nécessite des algorithmes adaptatifs au changement de la topologie du réseau.

1.2.1.2 Nœud puits

Le nœud puits, nommé station de base, est la porte vers le monde extérieur qui fait l'interface entre les nœuds capteurs et l'utilisateur des données. Le rôle de la station de base consiste à collecter les données envoyées par les nœuds capteurs et les renvoyer à l'utilisateur et dans certaines applications à envoyer des requêtes aux nœuds capteurs. La station de base est généralement un nœud beaucoup plus puissant que les nœuds capteurs et elle n'a pas de contraintes énergétiques.

Dans le cas le plus simple, la station de base sera dans le voisinage direct des nœuds capteurs et le réseau sera un réseau de type étoile à un seul saut. La situation de la

station de base à une position centrale dans le réseau est favorable, puisque la distance moyenne entre les nœuds capteurs et la station de base sera minimisée. De plus, une position centrale de la station de base permet une meilleure répartition de l'utilisation du canal. Dans le cas d'un réseau à grande échelle, la station de base ne sera pas dans le voisinage de tous les nœuds capteurs et les messages seront acheminés du nœud capteur source vers la station de base en transitant par plusieurs nœuds capteurs, selon un mode de communication multi-sauts. De même, la situation de la station de base à une position centrale permet de minimiser le nombre de sauts moyen pour des transferts entre la station de base et les nœuds capteurs dans les sens ascendant et descendant. Cependant, dans de nombreux cas, la station de base se retrouve plutôt en périphérie du réseau ce qui a des conséquences sur les performances globales et sur l'énergie globalement dépensée.

La station de base peut être située d'une manière statique à proximité des nœuds capteurs ou être mobile afin qu'elle puisse se déplacer autour des nœuds capteurs et collecter les données. Dans les deux cas, la station de base ne peut pas être atteinte efficacement par tous les nœuds capteurs dans le réseau.

1.2.2 Architecture logicielle

Les systèmes d'exploitation développés pour les systèmes embarqués ne s'adaptent pas bien aux spécificités des réseaux de capteurs sans fil, à la fois en termes de coût processeur que d'occupation mémoire. Pour répondre aux besoins des réseaux de capteurs sans fil, de nouveaux systèmes d'exploitation ont été développés comme par exemple TinyOS et Contiki. TinyOS est un système d'exploitation open source développé à l'Université de Berkeley. Ce système d'exploitation a été conçu pour réduire au maximum la consommation d'énergie des nœuds capteurs. TinyOS est actuellement utilisé par plusieurs universités et centres de recherche dans le monde. La réalisation de programmes sur cette plateforme s'effectue exclusivement en langage [NesC](#) (dialecte du langage C).

1.3 Applications

1.3.1 Types d'applications

En général, les réseaux de capteurs sans fil suivent un modèle où les nœuds capteurs transmettent des flots de données à une station de base. Selon le mode de communication des données de mesure les applications des réseaux de capteurs sans fil peuvent être de l'un des quatre types suivants : applications orientées événement, applications orientées temps,

applications orientées requête ou applications hybrides. Pour chaque type d'applications les réseaux de capteurs ont des caractéristiques différentes.

1.3.1.1 Applications orientées événement (event-driven)

Dans ce type d'applications l'envoi de données vers la station de base est déclenché lorsqu'un événement particulier est détecté. Les nœuds capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit. Les événements peuvent être causés par le dépassement d'un seuil dans les mesures récoltées par le capteur. On peut citer l'exemple de détection des feux de forêts où un nœud capteur envoie des alarmes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil. Dans l'exemple de la Figure 1.3 (a), un nœud capteur détecte un événement dans sa zone de détection, et commence à envoyer ses mesures à la station de base (BS) à travers plusieurs nœuds.

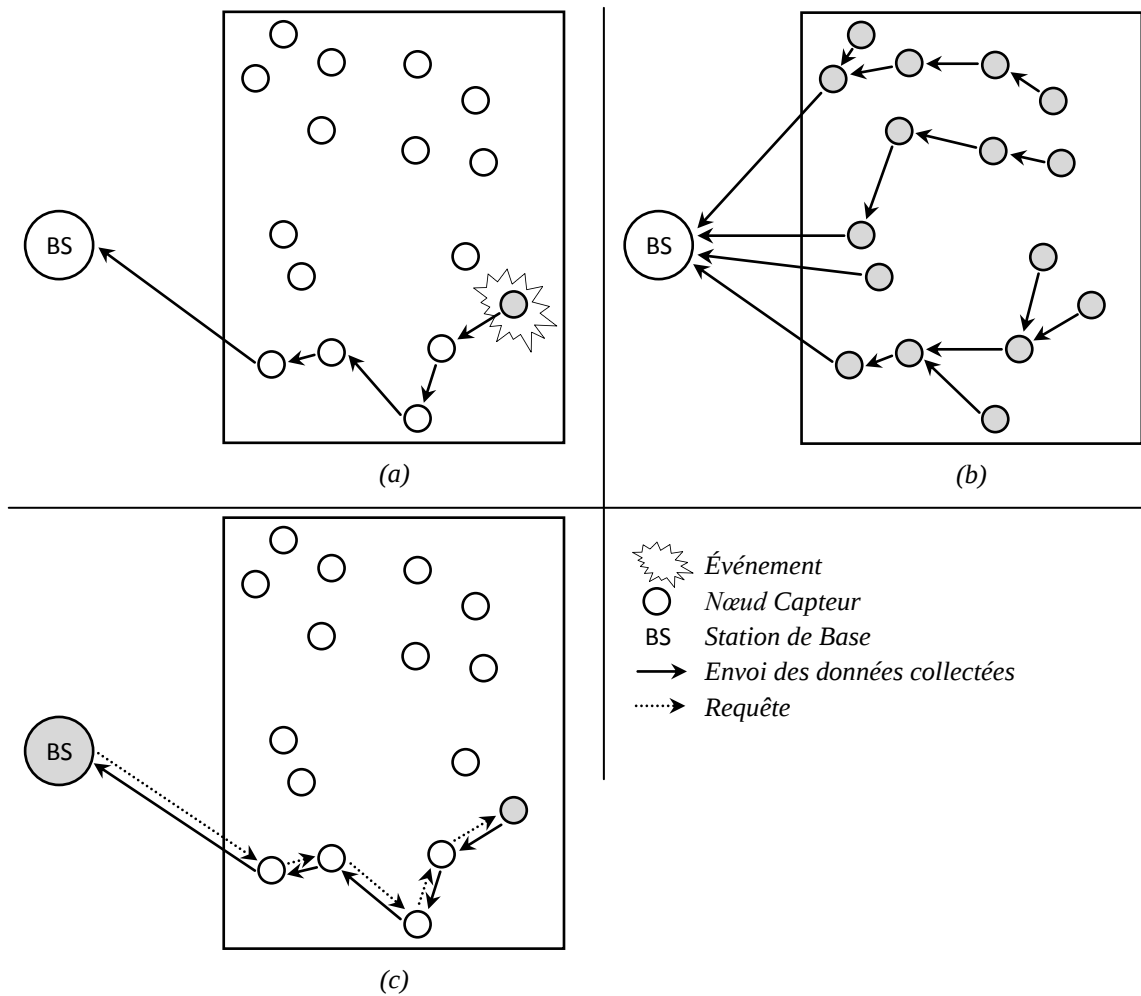


FIGURE 1.3 – Types d'applications. Application orientée événement (a). Application orientée temps (b). Application orientée requête (c)

Ce modèle est recommandé pour les applications de surveillance d'événements critiques où le but principal est l'obtention d'une information sur l'événement le plus rapidement possible. Au départ, cette classe d'application était conçue à des fins militaires, comme la surveillance du déplacement d'objets dans un champ de bataille. Par la suite, cette classe a rapidement trouvé de nouvelles perspectives comme le contrôle industriel, le contrôle médical des patients, la surveillance d'édifices (barrages, ponts, voies de chemins de fer, etc.).

1.3.1.2 Applications orientées temps (time-driven)

Cette classe représente les applications où l'acquisition et la transmission des données capturées sont liées au temps. Les nœuds capteurs collectent et envoient les données à la station de base de manière périodique. La période d'acquisition peut être, plus ou moins longue selon l'application, de quelques secondes jusqu'à quelques heures voire des jours. Ainsi, la quantité des données échangées dans le réseau dépend de la périodicité des mesures à effectuer sur l'environnement local. Dans l'exemple de la Figure 1.3 (b), les nœuds capteurs collectent des données périodiquement, puis, ils les envoient vers la station de base.

Le type d'applications visé ici concerne les applications de type surveillance où le but principal est d'avoir une information régulière de la zone surveillée. La collecte de données environnementales peut représenter un bon exemple de cette classe d'applications dans des domaines variés : agriculture, expérimentation scientifique, etc.

1.3.1.3 Applications orientées requête (query-driven)

Dans cette classe les nœuds capteurs envoient de l'information uniquement suite à une requête explicite de la station de base. Les nœuds capteurs attendent de recevoir une requête pour déclencher une mesure et l'envoyer. Cette requête peut être générée par la demande manuelle d'un utilisateur ou une tâche automatique programmée. Cette classe d'application est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur. Ce dernier peut requérir des informations à partir de certaines régions dans le réseau ou interroger les nœuds capteurs pour acquérir des mesures d'intérêts. Dans l'exemple de la Figure 1.3 (c), une demande est adressée à un nœud capteur, le message est acheminé à travers plusieurs nœuds, à sa réception, le nœud capteur active son unité d'acquisition et envoie ses mesures à la station de base, dans cet exemple par le chemin constitué des mêmes nœuds intermédiaires.

COUGAR¹ est un exemple d'interface-usager qui permet au nœud de contrôle d'inter-

1. The COUGAR Project, "COUGAR : The Network Is The Database", Cornell University, <http://www.cs.cornell.edu/bigreddata/cougar/index.php>

roger le réseau de capteurs sans fil moyennant des requêtes dans un langage évolué inspiré de [SQL](#). Le réseau est alors considéré comme une base de données répartie à laquelle le nœud de contrôle peut émettre des requêtes. Les nœuds capteurs reçoivent ces requêtes, les exécutent et renvoient les résultats.

1.3.1.4 Applications hybrides

Ce type d'applications met en œuvre les trois modes de fonctionnement décrits précédemment. Par exemple, le réseau peut combiner entre une application de collecte de données par événements (application orientée événement) et une application de surveillance (application orientée temps).

1.3.2 Domaines d'application

Le besoin d'observer et de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression, la luminosité, est essentiel pour de nombreuses applications. La miniaturisation, le faible coût, la large gamme des types de capteurs disponibles (thermique, acoustique, etc.) ainsi que le support de communication sans fil utilisé, permettent aux réseaux de capteurs sans fil d'envahir plusieurs domaines d'applications. Parmi les domaines où ces réseaux se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions, on peut citer le domaine militaire, la sécurité, la domotique, l'environnement, la santé et l'industrie. Dans ce qui suit, nous présentons quelques exemples d'applications potentielles dans ces différents domaines.

1.3.2.1 Domaine militaire

Les premières applications des réseaux de capteurs sans fil ont concerné le domaine militaire. Comme beaucoup d'autres technologies, les réseaux de capteurs sans fil proviennent principalement de la recherche militaire. L'idée était de déployer un réseau de capteurs nanoscopiques (invisibles) sur des champs de bataille ou des zones ennemies pour surveiller le mouvement des troupes. Lors de la guerre froide, les réseaux de capteurs sans fil ont été utilisés, sous une forme assez primitive, par les Américains qui ont placé dans l'océan un système appelé [SOSUS](#) (Sound Surveillance System) [14] composé de capteurs acoustiques pour surveiller les sous-marins silencieux russes. Le projet [DSN](#) (Distributed Sensor Network) [14] du [DARPA](#) (Defense Advanced Research Projects Agency) était l'un des premiers projets dans les années 80 ayant utilisés les réseaux de capteurs sans fil pour rassembler des données distribuées.

Le déploiement rapide, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sans fil sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable dans le domaine militaire. Les réseaux de capteurs sans fil peuvent aider les unités militaires. Les capteurs sans fil peuvent être rapidement déployés et utilisés pour surveiller des endroits stratégiques ou difficiles d'accès comme des champs de bataille afin de fournir des renseignements concernant l'emplacement, le nombre, le mouvement et l'identité des soldats et des véhicules, ou bien encore analyser un terrain et détecter des agents chimiques, biologiques ou des radiations avant d'y envoyer des troupes.

1.3.2.2 Sécurité

L'application des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. L'intégration des nœuds capteurs dans des grandes structures telles que les ponts, les bâtiments et les barrages aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement. Par exemple, la détection rapide de fuites d'eau dans le cas des barrages permettrait d'éviter des dégâts. Les nœuds capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton, sans aucune alimentation électrique ou autres connexions filaires, doivent s'activer périodiquement pour pouvoir fonctionner durant des années. La surveillance des voies ferrées pour prévenir des accidents avec des animaux et des êtres humains peut être une application intéressante des réseaux de capteurs sans fil. Le déploiement d'un réseau de capteurs sans fil de mouvement peut constituer un système d'alarme distribué qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance. Désactiver ce système ne serait plus aussi simple, puisqu'il n'existe pas de point critique.

1.3.2.3 Domotique

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés pour surveiller les habitations et contribuer au confort domestique, en transformant les logements en environnements intelligents dont les paramètres : température, pression, humidité, luminosité, etc. s'adaptent automatiquement au comportement des individus [41]. Les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, etc. Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à l'utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance. Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière s'éteint et la musique se met en état d'arrêt quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, le déclenchement d'une alarme par le capteur anti-intrusion quand

un intrus veut accéder à la maison. Dans les immeubles, le système de climatisation peut être conçu en intégrant plusieurs capteurs dans les tuiles du plancher et les meubles. La climatisation pourra être déclenchée seulement aux endroits où il y a des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire. Le système distribué pourra aussi maintenir une température homogène dans les pièces.

1.3.2.4 Environnement

Dans le domaine de l'environnement, les réseaux de capteurs sans fil peuvent localiser et suivre le mouvement de certains animaux, détecter des catastrophes naturelles telles que les feux de forêts, les tempêtes, les inondations, les volcans ou encore surveiller l'évolution de la densité moyenne de CO_2 dans l'air [5]. Un grand nombre de capteurs sans fil peuvent être déployés en forêt ou dans un environnement de conservation de la faune afin de recueillir des informations diverses sur l'état du milieu naturel et sur les comportements de déplacement. Par exemple, l'Université de Pise en Italie a réalisé des réseaux de capteurs sans fil pour le contrôle des parcs naturels (feux, animaux, ...). Il est ainsi possible d'observer, sans déranger, les espèces animales difficiles à étudier dans leur environnement naturel et de proposer des solutions plus efficaces pour la conservation de la faune. Des thermo-capteurs dispersés à partir d'un avion sur une forêt peuvent signaler un éventuel début d'incendie, ce qui permettra une meilleure efficacité pour la lutte contre les feux de forêt. Différents systèmes sont là pour prévenir le feu : taux d'humidité des végétaux, la chaleur ambiante, etc. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air. La surveillance de polluants comme par exemple l'ozone, le NO_2 ou encore le CO_2 pourrait considérablement augmenter la qualité de vie dans les villes. Sur les sites industriels, les centrales nucléaires ou dans les pétroliers, des capteurs peuvent être déployés pour détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.) et alerter les utilisateurs dans un délai suffisamment court pour permettre une intervention efficace. Dans les champs agricoles, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques. Par exemple, les capteurs peuvent être semés avec les graines pour déclencher le processus d'irrigation lors de la détection des zones sèches. Ainsi, les zones sèches seront facilement identifiées et l'irrigation sera donc plus efficace.

1.3.2.5 Santé

Dans le domaine de la santé, l'utilisation des capteurs sans fil pourrait apporter une surveillance permanente des patients (surveillance de la glycémie, etc.) et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité telles que la tension

artérielle et les battements du cœur, facilitant ainsi le diagnostic de quelques maladies. La surveillance des fonctions vitales pourrait être possible grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau. Des micro-caméras, qui peuvent être avalées, sont capables sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain. D'autre part, les capteurs sans fil peuvent détecter des comportements anormaux (chute d'un lit, choc, cri, etc.) chez les personnes handicapées ou âgées.

1.3.2.6 Industrie

Dans le domaine de l'industrie, les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés dans la surveillance des infrastructures, des installations et des zones critiques. Pour les entreprises manufacturières, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts. Les capteurs peuvent être placés sur des boîtes de marchandise dans une usine ou un entrepôt pour suivre en temps réel le mouvement des marchandises, ou encore détecter le dysfonctionnement d'une machine en analysant ses émissions acoustiques et vibratoires. Les capteurs intégrés au processus de stockage et de livraison pourront être utilisés pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la localisation actuelle du paquet.

1.4 Contraintes de conception

Les réseaux de capteurs sont dédiés par application. Donc, l'application pour laquelle un réseau de capteurs va servir déterminera les caractéristiques de ce dernier. En effet, elle va imposer l'environnement de déploiement des nœuds capteurs, leur nombre et leurs mouvements s'il y en a. Elle caractérisera aussi le trafic de données qui circulera dans le réseau : le débit d'émission, le type des données et surtout le mode d'envoi de celles-ci (initié par la destination, déclenché par l'occurrence de certains événements ou répétés périodiquement). Aussi, la nature de l'application va préciser la nature même des nœuds capteurs et leurs contraintes énergétiques. Donc, la conception des réseaux de capteurs sans fil est confrontée aux exigences des applications telles que la scalabilité, la durée de vie et la tolérance aux pannes. Ces facteurs représentent la base de la conception des protocoles et des algorithmes pour les réseaux de capteurs sans fil et peuvent même être utilisés pour comparer les différents protocoles et algorithmes proposés. Les principales contraintes peuvent être résumées comme suit :

1.4.1 Architecture et taille des nœuds capteurs

Les nœuds capteurs sont spécifiques à une application. L'architecture et la taille des nœuds capteurs diffèrent selon l'application à laquelle ils sont destinés. Au minimum, chaque nœud capteur doit avoir quatre composants de base : une unité d'acquisition, une unité de traitement, une unité de transmission et une unité d'énergie. Tous ces composants doivent être insérés dans une boîte. La taille requise peut être très petite. Pour chaque application, les nœuds capteurs varient en fonction des types de capteurs utilisés (thermomètres, capteurs de lumière, capteurs d'humidité, capteurs de vibration, microphones, etc.), de la capacité de calcul, de la taille de la mémoire, de la bande passante et de la quantité d'énergie. Les nœuds capteurs peuvent avoir besoin de composants supplémentaires dépendant de l'application tels qu'un générateur d'énergie, un système de localisation et un mobilisateur. Cependant, toutes les fonctionnalités supplémentaires augmentent la consommation d'énergie et la taille physique des nœuds capteurs. Ainsi, les fonctionnalités supplémentaires doivent être toujours équilibrées par rapport aux exigences de petite taille et de faible consommation.

1.4.2 Scalabilité

Le nombre de nœuds dans un réseau de capteurs sans fil dépend de l'application. Les nœuds capteurs déployés dans l'étude d'un phénomène peuvent être de l'ordre de centaines ou de milliers. Quelques applications des réseaux de capteurs sans fil nécessitent une utilisation allant jusqu'à des dizaines de milliers de nœuds [6]. La densité peut varier de quelques nœuds capteurs à quelques centaines dans une région, qui peut être inférieure à 10m de diamètre. Un nombre aussi important de nœuds capteurs engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que le nœud puits (station de base) soit équipé d'une mémoire suffisante pour stocker les informations reçues. Semblables à d'autres réseaux de communication, la scalabilité est l'un des attributs principaux pour les réseaux de capteurs sans fil. Des problèmes liés au passage à l'échelle tels que l'adressage, le routage, la gestion de la localisation des nœuds capteurs et la configuration du réseau, la sécurité, etc. doivent être résolus pour une meilleure gestion du réseau. La conception et l'exploitation de tels réseaux de grande taille nécessite une manipulation soigneuse et des stratégies de gestion. Les nouveaux protocoles et algorithmes doivent être capables de travailler avec un grand nombre de nœuds capteurs. Ils doivent également utiliser la haute densité des réseaux de capteurs sans fil. Pour supporter la scalabilité et couvrir une grande zone d'intérêt sans dégrader le service du système, les nœuds capteurs sont souvent regroupés en clusters.

1.4.3 Coût de production

L'intérêt d'une nouvelle technologie est de gagner du temps et de l'argent. Généralement, les réseaux de capteurs sans fil se composent d'un grand nombre de nœuds capteurs. Le coût de production d'un seul nœud capteur est très important pour le coût total du réseau. Le coût de chaque nœud capteur doit être faible pour que le coût global du réseau ne soit pas supérieur à celui d'un réseau classique afin de pouvoir justifier son intérêt.

Mis à part la petite taille, la capacité à fonctionner dans de hautes densités volumétriques et le faible coût de production, il y a quelques autres contraintes strictes pour les nœuds capteurs. Ces nœuds doivent être autonomes, fonctionner sans surveillance et être adaptés à l'environnement.

1.4.4 Environnement

Une des attentes des réseaux de capteurs sans fil est leur capacité à être déployés rapidement dans des conditions difficiles par exemple dans des zones géographiques distantes ou inaccessibles. L'environnement peut être un océan, un champ de bataille, un champ contaminé par des produits chimiques ou biologiques, une maison ou encore un bâtiment. Les nœuds capteurs doivent être, donc, conçus d'une manière à résister aux différentes conditions de l'environnement : forte chaleur, pluie, etc.

1.4.5 Déploiement

On distingue généralement trois phases dans la mise en place et l'évolution d'un réseau de capteurs sans fil : déploiement, exploitation (post-déploiement) et redéploiement. Les nœuds capteurs sont déployés dans une zone d'intérêt pour surveiller les événements et collecter des données sur l'environnement. Le déploiement des nœuds capteurs est un facteur dépendant de l'application. Le déploiement peut être déterministe, aléatoire ou les nœuds sont mobiles. Dans le cas d'un déploiement déterministe (prédéfini), les nœuds capteurs peuvent être placés manuellement un par un par un être humain ou un robot. Dans le cas d'un déploiement aléatoire, les nœuds capteurs peuvent être jetés aléatoirement par un avion dans la zone d'intérêt. Dans le cas de nœuds mobiles, les nœuds peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement et arbitrairement, tels que les véhicules ou les animaux, ou être dotés de mobilisateurs. Durant la phase d'exploitation, la topologie du réseau peut être soumise à des changements. Ces changements sont dus à des modifications de la position des nœuds capteurs, à l'accessibilité en raison d'interférence, bruit, obstacles mobiles, etc., à l'énergie disponible et au dysfonctionnement. Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles, par exemple un champ

de batail, la défaillance d'un nœud capteur est, donc, très probable. Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie. Pour ajouter une fonctionnalité ou remplacer les nœuds défectueux, il suffit de positionner de nouveaux nœuds capteurs qui s'intégreront de façon autonome au reste du réseau. L'ajout de nouveaux nœuds capteurs dans un réseau existant implique aussi une remise à jour de la topologie. La mobilité des nœuds, la suppression des nœuds défaillants et la possibilité d'étendre le réseau par ajout de nouveaux nœuds changent fréquemment la topologie des réseaux de capteurs sans fil. Ceci nécessite une maintenance permanente pour assurer le bon fonctionnement du réseau.

1.4.5.1 Déploiement régulier

Dans cette première stratégie, les nœuds capteurs sont placés manuellement à des positions bien définies par un être humain ou un robot. En raison des conditions défavorables, les nœuds capteurs ne sont pas toujours déployés de manière uniforme dans la zone d'intérêt. La nature de certaines applications des réseaux de capteurs sans fil nécessite un déploiement aléatoire des nœuds capteurs.

1.4.5.2 Déploiement aléatoire

Dans des environnements inaccessibles par exemple en cas de catastrophes, les nœuds capteurs sont déployés aléatoirement dans la région d'intérêt et devraient fonctionner de manière autonome. Les nœuds capteurs sont déployés à distance de manière aléatoire par des moyens relativement incontrôlés, par exemple jetés d'un avion. Dans ce cas, les nœuds devraient collectivement former un réseau de manière ad hoc. La position des nœuds capteurs est fixée une fois qu'ils sont déployés et ne peut pas être ni prédéterminée ni modifiée. Cela signifie que les algorithmes et les protocoles des réseaux de capteurs sans fil doivent posséder des capacités d'auto-organisation et être efficaces en énergie parce que l'énergie des nœuds capteurs est limitée et leurs batteries ne peuvent pas être rechargées ou remplacées dans de tels environnements. Ce déploiement est considéré comme imparfait, par exemple, certaines zones peuvent ne pas être couvertes par des nœuds capteurs, des nœuds peuvent être trop éloignés pour pouvoir communiquer ou des obstacles empêchent cette communication.

1.4.5.3 Nœuds mobiles

La mobilité est fortement liée l'application en question. Dans un réseau de capteurs sans fil, les nœuds capteurs sont généralement statiques, excepté pour certaines applications, où les nœuds sont libres de bouger. Par exemple, dans le contrôle de l'environnement, la

mobilité des nœuds capteurs n'existe pas, par contre dans la surveillance des animaux les nœuds capteurs sont attachés à ces derniers. Lorsque la mobilité est trop fréquente, elle ne peut être considérée comme un problème secondaire. Dans certaines applications, les nœuds sont attachés à des objets mobiles qui se déplacent librement, tels que des véhicules ou des animaux, introduisant une topologie instable du réseau. Ainsi, la détection des voisins et la reconfiguration du réseau exige habituellement un nombre important de messages de contrôle de la topologie, donc une dépense importante d'énergie. En outre, un autre type de mobilité pourrait être pris en compte, qui est la mobilité de la station de base ou les deux types de dispositifs peuvent être mobiles simultanément.

1.4.6 Couverture

Deux unités sont fondamentales pour le fonctionnement d'un nœud capteur : l'unité d'acquisition qui permet la prise de mesures et l'unité de communication qui réalise la transmission de celles-ci. Ainsi, chaque nœud capteur possède un rayon de détection ou rayon de couverture (R_d) et un rayon de communication (R_c). La Figure 1.4 montre les zones définies par ces deux rayons pour le nœud capteur A . La zone de détection ou d'acquisition est la zone où le nœud capteur A peut détecter l'événement. La zone de communication est la zone où le nœud capteur A peut communiquer avec les autres nœuds capteurs (les nœuds B et C dans la Figure 1.4). Généralement, les nœuds capteurs sont capables de varier la puissance du signal émis afin d'élargir/réduire le rayon de communication et en conséquence la zone de communication.

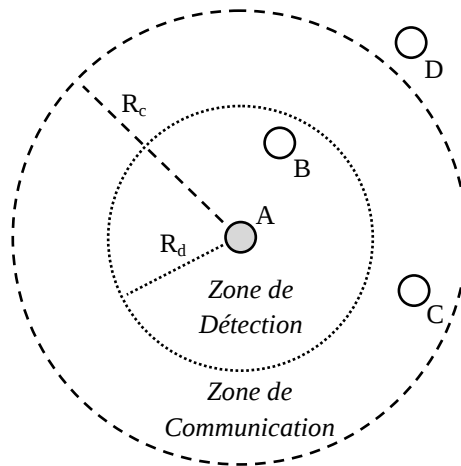


FIGURE 1.4 – Rayons de détection et de communication d'un nœud capteur

Dans tout déploiement de réseaux de capteurs sans fil, il est généralement important d'assurer une couverture importante de la zone surveillée, c'est à dire que, si un événement a lieu à n'importe quel point géographique de la zone surveillée, il doit être détecté par au

moins un nœud capteur. Pour minimiser la consommation d'énergie, la couverture totale de la zone de déploiement peut être assurée par un ensemble de nœuds capteurs actifs connectés entre eux afin d'acheminer les données récoltées vers la station de base. Les nœuds capteurs actifs peuvent être désignés de multiples façons.

1.4.7 Média de transmission

Dans les télécommunications, les supports de transmission peuvent être classés selon deux types différents : filaire et sans fil. Le but de ces supports est de transporter un flot de bits d'information d'une source vers une destination. Les nœuds d'un réseau de capteurs sans fil sont reliés bien évidemment par une architecture sans fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être normé. On utilise le plus souvent l'infrarouge qui est robuste aux interférences et peu onéreux, et les communications radio.

1.4.8 Durée de vie

La vie d'un réseau de capteurs sans fil comprend trois phases distinctes avec des caractéristiques particulières : la naissance, le fonctionnement normal et la mort. La phase de naissance correspond à l'arrivée progressive des nœuds, que ce soit durant le déploiement initial du réseau ou durant le redéploiement de nouveaux nœuds. La phase de fonctionnement normal commence dès que les nœuds s'auto-organisent. La troisième phase commence quand les nœuds commencent à disparaître à cause d'une défaillance ou d'un trop faible niveau d'énergie.

La durée de vie est critique dans tout déploiement de réseaux de capteurs sans fil. La définition de la durée de vie dépend de l'application du réseau de capteurs. Elle peut être définie par la durée jusqu'au moment où le premier ou le dernier nœud meurt. A noter qu'une fois qu'un nœud capteur a épuisé son énergie, il est considéré comme défaillant (mort). Par exemple, dans une application militaire où les nœuds capteurs surveillent l'activité chimique, la durée de vie d'un nœud capteur est critique pour la couverture maximale de la zone surveillée. La durée de vie 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 non-couverture de sous-régions et/ou le partitionnement du réseau. L'emplacement des nœuds défaillants est important. Si la proportion des nœuds qui ont manqué d'énergie est située dans une certaine partie critique du réseau, par exemple, reliant la station de base et le reste du réseau, cela peut avoir comme conséquence le dysfonctionnement précoce du réseau entier.

Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau de capteurs peut varier de quelques mois à plusieurs années. Dans ce qui suit nous présentons quelques définitions proposées dans la littérature :

- La durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie [22] [46] [57] ;
- Demi-vie du réseau : la durée jusqu'à ce que 50% des nœuds épuisent leurs batteries et s'arrêtent de fonctionner [30] ;
- La durée jusqu'à ce qu'il reste au plus une certaine fraction β de nœuds survivants dans le réseau [13] [19] [29] ;
- La durée jusqu'à ce que tous les nœuds capteurs épuisent leur énergie [56] ;
- 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 [30] ;
- La durée jusqu'à ce que le réseau ne fournisse plus un taux acceptable de détection d'événements [56] ;
- La durée jusqu'à ce que le premier cluster-head épuise toute son énergie [55] ;

Dans toutes les définitions, la durée de vie du réseau de capteurs dépend de la consommation d'énergie des nœuds capteurs. Pour qu'un réseau de capteurs sans fil reste autonome pendant une durée de quelques mois à quelques années sans intervention humaine, la consommation d'énergie devient le problème fondamental. Maximiser la durée de vie du réseau de capteurs revient à réduire la consommation énergétique des nœuds capteurs.

1.4.9 Tolérance aux pannes

Certains nœuds capteurs peuvent tomber en panne ou être bloqués en raison des dommages physiques (écrasés par des animaux, lors du déploiement en les jetant d'un avion, etc.), des interférences environnementales ou plus fréquemment de l'épuisement d'énergie. Les nœuds peuvent également être sujets à des pannes dues à leur fabrication. Il peut donc y avoir des nœuds capteurs défectueux. La défaillance des nœuds capteurs ne devrait pas affecter la tâche globale du réseau de capteurs. C'est le problème de la fiabilité ou la tolérance aux pannes.

La tolérance aux pannes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau de capteurs sans aucune interruption due aux défaillances des nœuds capteurs. Si les nœuds capteurs sont déployés dans un habitat, la tolérance aux fautes exigée peut être basse puisque ce type de réseaux n'est pas facilement endommagé, alors que si les nœuds capteurs sont déployés dans un champ de bataille pour la surveillance et la détection, la tolérance aux fautes devrait être élevée puisque les données surveillées sont critiques et

les nœuds capteurs peuvent être détruits facilement par des actions hostiles.

1.4.10 Sécurité

Dans un réseau de capteurs sans fil, la protection physique des nœuds capteurs n'est pas assurée. En plus des attaques à distance classiquement étudiées dans les réseaux, on doit aussi considérer les attaques physiques, les tentatives de substitution de nœuds ou de détournement de fonction du réseau par noyautage de nœuds ennemis. Cet aspect doit être pris en compte selon l'application considérée. Pour les applications qui exigent un niveau de sécurité assez élevé telles que les applications militaires, des mécanismes d'authentification, de confidentialité et d'intégrité doivent être mis en place. Les algorithmes de cryptographie conçus pour les réseaux de capteurs doivent tenir compte des ressources limitées que présentent ces réseaux.

1.4.11 Qualité de service

Les caractéristiques particulières des réseaux de capteurs sans fil modifient les critères de performance par rapport aux réseaux sans fil traditionnels. Dans les réseaux locaux sans fil ou les réseaux cellulaires, les critères les plus importants à prendre en compte sont le débit et la latence. Avec la croissance de la technologie, les utilisateurs sont de plus en plus exigeants en termes d'utilisation de service. Dans le passé, les premières générations de réseaux cellulaires avaient uniquement pour but de transmettre la voix. Les nouvelles générations de réseaux cellulaires permettent aux utilisateurs de faire beaucoup plus d'activités : transfert d'images, transfert de vidéos, navigation sur Internet. Ces activités requièrent un débit important et une faible latence. Contrairement aux réseaux sans fil traditionnels qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service, dans les réseaux de capteurs sans fil, nous n'avons pas besoin d'un grand débit de transmission. Les réseaux de capteurs sans fil donnent de l'importance à la durée de vie, en intégrant des mécanismes qui permettent de conserver l'énergie des nœuds capteurs et prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque nœud capteur est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable. Comme les critères de performance des réseaux de capteurs sans fil diffèrent de ceux des réseaux classiques les solutions à apporter sont, donc, nouvelles.

Dans la plupart des applications des réseaux de capteurs sans fil, la durée de vie du réseau est favorisée au détriment de la qualité d'émission des données. Dans les applications de type surveillance (applications orientées temps), puisqu'on veut maximiser la durée de vie, le critère de consommation d'énergie est le problème prépondérant tandis que les autres critères comme le débit ou l'utilisation de la bande passante sont devenus secondaires.

Cependant, pour certains types d'application, nous pourrions avoir besoin d'autres critères de performance. Comme dans le cas où le type de trafic nécessite une certaine garantie de qualité de service, à l'instar des trafics multimédia et temps réel. A titre d'exemple, dans les applications orientées événements, nous voulons obtenir des informations à plus faible latence lorsqu'un événement se produit. Dans ce type d'applications, la donnée doit être transmise dans une certaine plage de temps, après quoi, elle n'aura aucune importance. La réception des données doit être assurée et le délai de transmission doit être limité.

1.5 Communication

Dans un réseau, lorsque deux entités ou nœuds veulent communiquer ensemble, deux situations sont possibles : soit ils sont voisins et peuvent directement échanger des messages, soit ils sont éloignés l'un de l'autre, auquel cas les messages doivent être retransmis de proche en proche en utilisant un protocole de routage. Dans les réseaux de capteurs sans fil, la communication de données se fait essentiellement dans le sens des nœuds capteurs vers la station de base. Comme les nœuds capteurs ont une portée de transmission très limitée, le processus d'acheminement des données se fait généralement en mode multi-sauts.

1.5.1 Types de communication

Dans les réseaux de capteurs sans fil, la communication, du point de vue des entités communicantes, peut être divisée en trois types : communication des nœuds capteurs avec la station de base, communication entre nœuds capteurs et communication de la station de base avec les nœuds capteurs.

1.5.1.1 Communication des nœuds capteurs avec la station de base

La station de base est la destination finale de tous les paquets de données. La communication des nœuds capteurs avec la station de base est utilisée pour envoyer les données capturées et collectées par les nœuds capteurs. La manière de collecter les données dans les réseaux de capteurs peut changer selon l'application qui en est faite. Ainsi, dans les applications orientées événements, les nœuds capteurs doivent seulement transmettre une alerte à la station de base quand un événement pertinent survient ou quand un changement brusque se produit. Dans les applications orientées temps impliquant la collecte de données périodique, les nœuds capteurs transmettent régulièrement leurs mesures à la station de base. Dans les applications orientées requêtes, les nœuds capteurs attendent de recevoir une requête de la station de base pour déclencher une mesure et l'envoyer. Dans tous les cas, les nœuds capteurs envoient les mesures directement ou en mode multi-sauts à la

station de base. Ce dernier mode inclut la plupart des protocoles de routage proposés dans la littérature.

1.5.1.2 Communication entre nœuds capteurs

La communication entre les nœuds capteurs voisins se présente souvent lorsqu'une coopération entre les nœuds est nécessaire. Par exemple, les nœuds échangent des informations dans le but de construire une vue globale.

1.5.1.3 Communication de la station de base avec les nœuds capteurs

La communication de la station de base avec les nœuds capteurs est souvent utilisée pour disséminer une information qui est importante à ces nœuds. En se basant sur un algorithme de dissémination efficace, la station de base peut effectuer différentes activités, telles que : activer/désactiver un ou plusieurs nœuds capteurs ou envoyer des requêtes au réseau. La diffusion est une manière d'acheminer les messages, de type un vers tous. Dans ce cas, aucun routage n'est nécessaire puisqu'aucune route n'est requise.

1.5.2 Pile protocolaire

Tout comme les autres types de réseaux sans fil, les réseaux de capteurs reposent sur un modèle de communication en couches. La pile protocolaire utilisée par les nœuds capteurs et la station de base est donnée par la Figure 1.5. Cette pile de protocoles se compose de cinq couches et trois plans : couche physique, couche liaison de données, couche réseau, couche transport et couche application, plan de gestion d'énergie, plan de gestion de mobilité et plan de gestion des tâches. Ces trois plans ou niveaux sont accessibles par toutes les couches de la pile. Les plans de gestion surveillent et gèrent la consommation d'énergie, les mouvements et la distribution des tâches entre les nœuds capteurs. Ces plans sont nécessaires pour que les nœuds capteurs puissent travailler ensemble de manière efficace en énergie en baissant la consommation d'énergie globale, coordonner les tâches d'acquisition, router les données dans un réseau de capteurs mobiles et partager les ressources. Du point de vue global, il est plus efficace d'utiliser des nœuds capteurs pouvant collaborer entre eux. La durée de vie du réseau peut être ainsi prolongée.

1.5.2.1 Couche application

Selon les tâches de captage, différents types de logiciels d'application peuvent être construits et utilisés sur la couche application. Par exemple, cette couche applicative permet à l'utilisateur d'interroger le réseau, sur la valeur d'une certaine variable physique, ou encore l'endroit spécifique où une certaine variable satisfait à un critère donné.

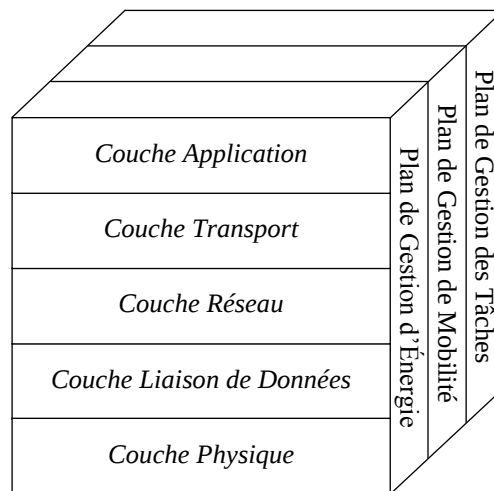


FIGURE 1.5 – Pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil

1.5.2.2 Couche transport

La couche transport, quant à elle, a une importance particulière dans les réseaux de capteurs sans fil car elle assure l’acheminement de bout en bout des messages, dans un environnement peu fiable à cause des conditions du canal radio et de l’instabilité de la topologie du réseau, qui peuvent provoquer la perte de messages.

1.5.2.3 Couche réseau

La couche réseau s’occupe du routage de données fournies par la couche transport. Le routage de données a une importance capitale dans les réseaux de capteurs sans fil et il soulève beaucoup de défis à cause des contraintes intrinsèques aux réseaux de capteurs.

1.5.2.4 Couche liaison de données

Comme dans le cas des réseaux sans fil classiques, la gestion de l’accès au canal est opérée par la couche **MAC**, qui doit cependant être pensée différemment dans le cas des réseaux de capteurs sans fil, puisqu’elle doit prendre en compte la contrainte énergétique. Les protocoles **MAC** dédiés aux réseaux de capteurs sans fil devraient être efficaces en terme d’énergie, stables lorsque la taille du réseau augmente et robustes contre les changements fréquents de la topologie du réseau provoqués, par exemple, par la défaillance de quelques nœuds, la mobilité des nœuds, le déploiement de nouveaux nœuds, etc.

1.5.2.5 Couche physique

La couche physique répond aux besoins d’une modulation simple mais robuste, et de techniques de transmission et de réception. Cette couche est responsable de la sélection de

fréquence, le contrôle de la puissance de transmission, la génération de fréquence porteuse, la détection des signaux, etc. Lors la conception de la couche physique pour les réseaux de capteurs sans fil, la minimisation d'énergie assume une importance significative, en plus de la propagation et les effets d'atténuation.

1.5.2.6 Plan de gestion d'énergie

Ce plan gère comment un nœud capteur utilise son énergie. Par exemple, le nœud capteur peut éteindre son récepteur pour conserver l'énergie. Aussi, lorsque le niveau d'énergie du nœud capteur est bas, le nœud capteur peut diffuser à ses voisins qu'il est faible en énergie et ne peut pas participer au routage. L'énergie restante est réservée au captage.

1.5.2.7 Plan de gestion de mobilité

Le plan de gestion de mobilité détecte et enregistre le mouvement des nœuds capteurs et permet de maintenir le chemin d'un nœud capteur vers l'utilisateur et garder la trace de l'emplacement de ses voisins [5] [6].

1.5.2.8 Plan de gestion des tâches

Le plan de gestion de tâches équilibre et ordonnance les tâches de captage de données. Les nœuds capteurs dans une région donnée, ne sont pas tous nécessaires pour effectuer la tâche de captage en même temps. Certains nœuds capteurs effectuent la tâche plus que d'autres selon leur niveau d'énergie.

1.6 Énergie

Dans les réseaux sans fil traditionnel la consommation d'énergie n'est pas un grand problème, car on peut toujours recharger ou remplacer les batteries des dispositifs sans fil comme les téléphones portables ou les ordinateurs portables. Alors que dans les réseaux de capteurs sans fil, l'énergie est considérée comme une ressource rare. En effet, les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries de petite taille, souvent non rechargeables et n'ont pas de mécanismes de production d'énergie. La recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse, difficile et parfois impossible. Imaginons un réseau de capteurs déployé au pôle Nord pour surveiller la variation de température. D'autre part, certaines applications des réseaux de capteurs sans fil nécessitent un déploiement aléatoire des nœuds capteurs, à grande échelle, dans des zones difficiles d'accès. Le remplacement des batteries n'est pas une option envisageable pour un réseau avec des milliers de nœuds dispersés aléatoirement.

Dans de telles situations, les nœuds capteurs sont jetables et devraient durer jusqu'à ce que leurs énergies s'épuisent. Il faut donc que les nœuds capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner pour une durée de l'ordre de plusieurs mois, voire de quelques années. En effet, tout le réseau pourrait devenir non opérationnel si trop de nœuds sont perdus à cause de la dissipation complète de leur énergie, car ceci peut engendrer des pertes de communication dues à de trop grandes distances entre les nœuds capteurs. De ce fait, la conservation de l'énergie est cruciale dans un réseau de capteurs sans fil parce que le fonctionnement de tout le réseau en dépend. Les chercheurs se concentrent actuellement sur la conception de protocoles et d'algorithmes efficaces en énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. Le principal objectif est de garantir une longue durée de vie et que l'intervention humaine pour cette optimisation soit inexistante. Afin de concevoir des solutions efficaces en énergie, il est extrêmement important de faire tout d'abord une analyse des différents facteurs provoquant la consommation de l'énergie d'un nœud capteur.

1.6.1 Consommation d'énergie

La tâche principale d'un nœud capteur dans une zone d'intérêt est d'acquérir des données de l'environnement entourant, effectuer des traitements de données locaux, puis transmettre les données. La consommation d'énergie peut donc être divisée en trois parties : acquisition, traitement de données et communication. Il est difficile de faire une étude quantitative et comparative précise de la consommation de chaque composant d'un nœud capteur en raison du grand nombre de plates-formes commerciales existantes. Cependant, des expérimentations ont montré que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur. Pottie et al. [48] ont montré que le transport de 1 Ko de données sur 100 m consomme autant d'énergie que le traitement de 3 millions d'instructions. On voit donc que la communication coûte chère et qu'il est préférable de traiter les données localement plutôt que de faire des communications entre les nœuds capteurs. La consommation de l'unité d'acquisition dépend du type du capteur. Mais, en général, elle représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommée par un nœud. Un autre aspect non négligeable est le phénomène d'auto-décharge de la batterie. En effet, cette dernière se décharge d'elle-même et perd de sa capacité au fil du temps.

1.6.1.1 Énergie d'acquisition

Il y a plusieurs sources de consommation d'énergie par l'unité d'acquisition, notamment l'échantillonnage et la conversion des signaux physiques en signaux électriques, le

conditionnement des signaux et la conversion analogique-numérique. La consommation d'électricité des convertisseurs représente la part la plus importante de la consommation d'énergie de l'unité d'acquisition. Étant donné la diversité des capteurs, il n'y a pas de valeurs typiques de l'énergie consommée. Par exemple, les capteurs passifs (température, sismiques, etc.) consomment le plus souvent peu d'énergie par rapport aux autres composants du nœud capteur. En revanche, la consommation des capteurs actifs tels que les sonars, les capteurs d'images peut être considérable. Les capteurs chimiques ou biologiques peuvent aussi être gourmands en énergie.

1.6.1.2 Énergie de traitement

Généralement, les microcontrôleurs (MCU) possèdent divers modes de fonctionnement : actif, idle et sommeil, à des fins de gestion d'énergie. Chaque mode est caractérisé par une quantité différente de consommation d'énergie. Par exemple, le microcontrôleur MSP4303 consomme 3 mW en mode actif, 98 μ W dans le mode idle et seulement 15 μ W dans le mode sommeil. La transition entre les modes de fonctionnement implique un surplus d'énergie et de la latence. Il existe d'autres formes de consommation d'énergie telles que les lectures et les écritures mémoire. Ainsi, les niveaux de consommation d'énergie des différents modes, les coûts de transition entre les modes mais encore le temps passé par le microcontrôleur dans chaque mode ont une incidence importante sur la consommation totale d'énergie d'un nœud capteur.

1.6.1.3 Énergie de Communication

La radio possède quatre modes de fonctionnement : émission, réception, idle et sommeil. Généralement, la consommation d'énergie en mode réception et en mode idle est similaire et elle représente environ la moitié de l'énergie consommée en mode émission. Par contre, la consommation d'énergie en mode sommeil est beaucoup plus basse. Le Tableau 1.1 illustre l'énergie de communication du capteur Mica2¹. Le passage de la radio d'un mode à un autre consomme aussi de l'énergie. Par exemple, quand la radio passe du mode sommeil au mode émission, une importante quantité d'énergie est consommée pour le démarrage de l'émetteur lui-même. Cette énergie est appelée l'énergie de transition.

1.6.2 Dissipation d'énergie

La dissipation d'énergie est toute consommation inutile que l'on peut éviter afin de conserver l'énergie des nœuds capteurs. La dissipation concerne surtout la partie communication. En effet, la radio est sujette à plusieurs phénomènes tels que l'écoute

1. Mica Sensors Specification. <http://www.xbow.com>

Mode	Énergie Consommée (<i>mW</i>)
Émission	80
Réception/Idle	30
Sommeil	0.003

TABLE 1.1 – Énergie de communication du capteur Mica2

inutile, les collisions et les messages de contrôle. Ces phénomènes sont les causes majeures de la perte d'énergie [30]. Dans ce qui suit, nous résumons les principales causes de dissipation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

1.6.2.1 Écoute passive (idle listening)

C'est l'écoute du support par un nœud capteur pour une éventuelle transmission vers lui. De ce fait, s'il n'y a pas de transmission, ce nœud capteur va consommer de l'énergie pour rien. En effet, quand un nœud capteur ne peut pas savoir le moment où les autres nœuds lui envoient des paquets, il doit toujours mettre sa radio en marche. Une radio dans ce mode de fonctionnement, appelé idle, est prête à recevoir, mais elle n'est pas en train de recevoir quoi que ce soit. Plusieurs types de radios présentent un coût en énergie significatif pour le mode idle. Ce mode consomme une énergie presque égale à celle consommée en mode réception. Ceci est coûteux et inutile dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. Pour éviter cette dissipation d'énergie, il faut éteindre la radio des nœuds capteurs le plus longtemps possible. Ceci pose le problème de la synchronisation des nœuds capteurs et la répartition des périodes de réveil. Il faut donc une couche **MAC** permettant aux nœuds capteurs d'avoir des phases de sommeil, tout en ne nuisant pas à la communication. Basculer en mode sommeil est une solution pour économiser de l'énergie, mais la transition entre les modes consomme également de l'énergie, la fréquence de cette transition doit alors rester raisonnable.

1.6.2.2 Écoute inutile (overhearing)

L'écoute inutile se présente quand un nœud capteur écoute des paquets qui ne lui sont pas destinés. A titre d'exemple, un nœud capteur peut recevoir un paquet destiné à un autre nœud ou recevoir des paquets redondants dont le contenu est sans intérêt pour le routage ou pour l'application car il a déjà été reçu par le nœud considéré. Puisque le médium est un environnement commun, lorsqu'un nœud capteur transmet des paquets, tous les nœuds qui se trouvent autour de lui sont obligés d'écouter cette transmission. Ce qui conduit à une perte d'énergie à cause de l'implication des autres nœuds capteurs dans la réception des données. Le coût de cette écoute peut être un facteur dominant de la dissipation d'énergie quand la charge de trafic est élevée et la densité des nœuds grande.

1.6.2.3 Envois infructueux (overmitting)

Ce cas arrive quand un nœud capteur envoie des paquets à un autre nœud qui n'est pas prêt à les recevoir parce qu'il est en mode sommeil par exemple ou hors de portée.

1.6.2.4 Collisions

Comme les nœuds capteurs partagent le même support de transmission, la transmission simultanée par plusieurs nœuds capteurs peut produire des collisions. Quand des paquets émis en même temps se heurtent, ils deviennent inexploitable et doivent être abandonnés. Ainsi, une importante énergie a été tout simplement perdue pour émettre et recevoir ces paquets. Les retransmettre par la suite, consomme de l'énergie. A noter que les retransmissions ne se font que pour les paquets envoyés en mode unicast (à un seul destinataire) et avec une demande d'acquittement.

On peut citer par exemple le phénomène du nœud caché. Quand deux nœuds A et C qui ne se voient pas, voient par contre tous les deux un troisième nœud B comme sur la Figure 1.6. Si A et C veulent tous les deux envoyer des paquets à B , A ne voyant pas C et C ne voyant pas A , ils pensent tous les deux que le médium pour envoyer des informations à B est libre et il va donc y avoir collision. D'autre part, lorsque le nœud A est en train de transmettre des paquets à B , C ne détecte pas cette transmission car il se trouve hors de la portée de A . Quand C trouve que le canal est libre, il commence à transmettre et cela provoque une collision sur B . Ce problème où un nœud transmet des paquets quand il n'a pas le droit est appelé le problème du nœud caché.

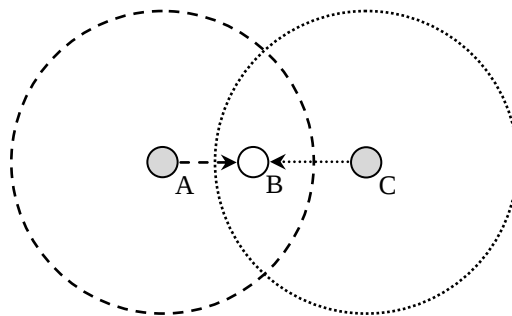


FIGURE 1.6 – Problème du nœud caché

1.6.2.5 Paquets de contrôle (Overhead)

Le canal sans fil est un médium de transmission bruité et il y a très souvent des erreurs de transmission. Plusieurs protocoles de la couche **MAC** fonctionnent par échange de paquets de contrôle pour assurer le bon fonctionnement. Par exemple, pour résoudre le

problème des nœuds cachés et assurer une réservation du canal, le mécanisme **RTS-CTS** (Request To Send, Clear To Send) peut être utilisé. Dans ce mécanisme, avant d'envoyer des données, l'émetteur envoie un paquet **RTS** au récepteur qui lui répond par un paquet **CTS** pour accepter ou refuser la conversation. Si le **CTS** n'est pas reçu, on estime que le **RTS** a subi une collision. Les paquets **RTS** et **CTS** contiennent des informations sur la taille des données à transmettre, ainsi les voisins de l'émetteur des données (qui entendent donc le paquet **RTS**) et du récepteur (qui entendent le **CTS**) peuvent calculer une estimation du temps durant lequel ils ne devront pas émettre sur le canal. En reprenant l'exemple précédent (Figure 1.6), le nœud *A*, comme cela est illustré sur la Figure 1.7 peut réserver le canal et ainsi empêcher *C* d'envoyer des paquets au nœud *B* qui provoqueraient une collision.

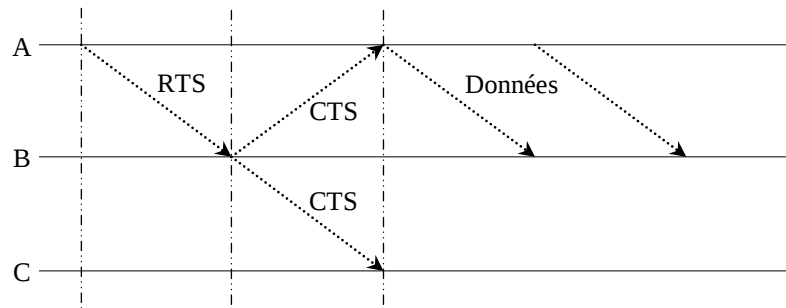


FIGURE 1.7 – Mécanisme RTS-CTS

L'utilisation des paquets de contrôle est une méthode efficace mais elle amplifie les quatre sources de dissipation citées précédemment. L'envoi, la réception, et l'écoute de ces paquets consomment de l'énergie. Comme les paquets de contrôle ne transportent pas directement des données, ils réduisent également le débit utile effectif.

1.6.2.6 Redondance des données

Les nœuds capteurs voisins peuvent produire les mêmes données à proximité d'un phénomène. En effet, quand le réseau est dense, les rayons de couverture des capteurs voisins se chevauchent, et un événement peut être détecté et rapporté par plusieurs nœuds capteurs, ce qui est inefficace du point de vue énergétique puisque certains nœuds capteurs vont dissiper de l'énergie inutilement dans l'acquisition, le traitement et la transmission des données.

1.6.3 Mécanismes de conservation d'énergie

L'énergie consommée par un réseau de capteurs sans fil est répartie entre l'acquisition, le traitement et la communication. Beaucoup de protocoles et mécanismes ont été proposés

dans la littérature pour optimiser la dissipation d'énergie. Ces mécanismes peuvent être catégorisés sommairement comme suit :

- La planification optimale des états des nœuds capteurs pour alterner entre un état où le capteur est allumé et un autre où il est éteint, tout en préservant le fonctionnement normal du réseau et la qualité de service requise.
- La compression de données pour réduire le taux de données transmises.
- Le contrôle efficace de la puissance de transmission afin de trouver un compromis entre la consommation d'énergie et la connectivité du réseau.
- L'accès efficace au canal afin de limiter les collisions et les retransmissions.
- Le routage avec conservation d'énergie, incluant des mécanismes de formation de clusters et d'agrégation des données.

1.6.3.1 Planification optimale des états des nœuds capteurs

Les nœuds capteurs voisins peuvent produire les mêmes données à proximité d'un phénomène, ce qui est inefficace du point de vue énergétique. Une première étape d'optimisation de l'énergie consommée consiste donc à déterminer un sous-ensemble optimal de couverture, c'est à dire un sous-ensemble de nœuds capteurs suffisant pour couvrir toute la zone surveillée. Les nœuds capteurs appartenant à ce sous-ensemble seraient allumés alors que les autres nœuds capteurs seraient éteints pour conserver leur énergie. Pour équilibrer la consommation d'énergie, le sous-ensemble optimal peut être recalculé périodiquement.

1.6.3.2 Accès efficace au canal

Les protocoles **MAC** doivent être conçus de manière à réduire les collisions, les retransmissions et le temps d'écoute passive afin réduire l'énergie consommée [5] [8]. Le moyen le plus efficace pour prolonger la vie d'un nœud capteur est de mettre la radio en mode sommeil le plus souvent possible. Cependant, un nœud en mode sommeil est un nœud inactif qui ne peut ni communiquer ni assurer son rôle dans le réseau. Cela induit des effets négatifs sur les performances du réseau. L'enjeu est donc de trouver un compromis entre la durée de vie du réseau et ses performances.

1.6.3.3 Clustering

Le clustering est l'une des techniques de conservation d'énergie les plus efficace dans les réseaux de capteurs sans fil. Cette technique consiste à regrouper les nœuds capteurs en clusters et à choisir les cluster-heads. Les membres du cluster communiquent seulement avec le cluster-head (station de base locale) qui s'occupe de la transmission des données collectées à la station de base globale. Cette approche réduit considérablement la distance

dont les nœuds ont besoin pour transmettre leurs données, puisque typiquement la station de base locale est proche de tous les nœuds du cluster. Le clustering est souvent utilisé avec une technique d'agrégation de données.

1.6.3.4 Agrégation/fusion de données

Dans les réseaux de capteurs, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer des données redondantes. Réduire la quantité des données redondantes transmises par les nœuds 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 des données redondantes est l'agrégation des données. Avec cette technique, les nœuds intermédiaires agrègent les données reçues de plusieurs sources. L'agrégation des données est très dépendante de l'application envisagée. Par exemple, si un réseau de capteurs a pour tâche de mesurer la température de différents points d'un bâtiment, l'agrégation peut consister à ne retenir que les températures minimales, maximales ou la moyenne.

1.6.3.5 Conception cross-layer

Dans les modèles classiques, les concepteurs essaient d'optimiser les performances au niveau d'une couche indépendamment des autres couches. Par exemple, le routage et les fonctions de la couche **MAC** sont optimisés indépendamment les uns des autres. Cependant, une telle indépendance est communément considérée comme trop onéreuse pour les réseaux de capteurs. Par conséquent, une coopération permettant un compromis entre performances, dépendance et flexibilité doit être proposée pour optimiser les capacités du réseau.

1.7 WSN vs. ad hoc

Les réseaux ad hoc ont été étudiés initialement à des fins militaires. Ces réseaux fournissent une infrastructure sans fil pour toute application où le déploiement d'une infrastructure filaire est trop contraignant ou non économique pour une utilisation temporaire. Grâce à leur aptitude d'auto-configuration et l'absence d'une infrastructure fixe, les réseaux ad hoc constituent une solution pratique et intéressante permettant de s'affranchir des contraintes de câblage et d'infrastructures de communication lourdes, et offrant mobilité, flexibilité et faible coût de déploiement et d'utilisation. Un réseau ad hoc est un système d'échange de données très utile permettant à un ensemble de nœuds de communiquer. Une telle communication sera directe lorsque le nœud destination se

trouve dans le voisinage immédiat du nœud émetteur. Sinon, le recours aux services des autres nœuds sera nécessaire. Les nœuds collaborent afin de trouver la localisation de la destination et lui acheminer le paquet.

Les réseaux de capteurs sans fil sont souvent considérés comme étant un type particulier des réseaux ad hoc. En effet, les réseaux de capteurs sans fil partagent avec les **MANET** (Mobile Ad hoc NETworks) plusieurs propriétés en commun, telles que l'absence d'infrastructure et les communications sans fil. Ces deux réseaux partagent les mêmes problématiques liées à l'aspect sans fil comme le partage du médium sans fil, le problème du terminal caché et du terminal exposé, les collisions, etc.

Les principales différences entre les réseaux de capteurs sans fil et les réseaux ad hoc sont les domaines d'application, le problème d'énergie et le facteur d'échelle. Les domaines d'application sont considérés comme une différence clé entre les deux architectures. Les nœuds d'un réseau de capteurs sans fil sont généralement beaucoup plus limités en termes de ressources, plus denses et moins mobiles. Le problème essentiel dans les réseaux ad hoc est la mobilité, alors que dans les réseaux de capteurs le degré de mobilité est lié à l'application. Dans les réseaux ad hoc, la consommation d'énergie est considérée comme un facteur déterminant mais pas primordial parce que les ressources énergétiques peuvent être remplacées par l'utilisateur. Les réseaux ad hoc se focalisent plus sur la **QoS** que sur la consommation d'énergie. Par contre, dans les réseaux de capteurs, la consommation d'énergie est une métrique de performance très importante puisque généralement les nœuds capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile voire impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des nœuds capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau. La taille d'un réseau ad hoc est habituellement considérée sur une échelle entre 10 et 100 nœuds, alors que la taille d'un réseau de capteurs est plutôt de l'ordre de plusieurs centaines, voire des milliers de nœuds. En outre, la densité de déploiement augmente considérablement dans les réseaux de capteurs sans fil, par exemple de l'ordre de 10 à 30 voisins usuellement.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à l'étude des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons posé les briques de base nécessaires à la compréhension de nos problématiques dans la suite de ce manuscrit. De nombreux protocoles et algorithmes ont été proposés pour les réseaux ad hoc. Ces solutions ne sont pas bien adaptées aux caractéristiques uniques et aux

exigences des applications des réseaux de capteurs sans fil. Beaucoup de chercheurs sont actuellement engagés dans le développement de protocoles et d'algorithmes qui répondent aux besoins des réseaux de capteurs sans fil. Dans le chapitre suivant nous présentons les protocoles de communication proposés pour ces réseaux.

Chapitre 2

Protocoles de communication

2.1 Introduction

Les protocoles de communication proposés pour les réseaux ad hoc sont généralement inadaptés aux spécificités des réseaux de capteurs, vu le type d'application spécifique et la fonction principale des nœuds capteurs qui est la collection des informations. De plus, les communications dans les réseaux de capteurs consistent souvent à remonter l'information à une entité centrale. Ce chapitre est découpé en trois parties. Dans la première partie, nous discutons les différentes contraintes qui influencent la conception des protocoles de communication pour les réseaux de capteurs sans fil. Dans la deuxième partie, nous présentons les types de protocoles [MAC](#) utilisés par les réseaux de capteurs sans fil. Ces protocoles sont regroupés en trois familles : les protocoles qui sont basés sur un accès aléatoire en [CSMA/CA](#), les protocoles basés sur un accès séquentiel selon un découpage temporel [TDMA](#) et les protocoles hybrides qui mélangent ces deux solutions. Plusieurs protocoles de routage ont été spécifiquement conçus pour répondre aux besoins des réseaux de capteurs sans fil. Dans la troisième partie, nous présentons une classification des protocoles de routage se trouvant dans la littérature.

2.2 Contraintes de conception des protocoles de communication

Dans les réseaux de capteurs sans fil, les contraintes imposées aux protocoles de communication dépendent des caractéristiques des nœuds capteurs ainsi que du type de l'application. En contraste avec les communications typiques des réseaux (client/serveur), toutes les applications dans les réseaux de capteurs sans fil nécessitent un flux de données collectées des sources vers une station de base ou réservoir. L'orientation de ce flux de

données est importante dans la conception des protocoles de routage car ces derniers auront pour but de favoriser cet aiguillage lors de l'envoi des données. Les caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil varient en fonction de l'application. En général, la plupart des applications considèrent que les nœuds capteurs, une fois déployés, sont statiques, excepté pour certaines applications, où les nœuds sont mobiles et libres de bouger. Par exemple, les nœuds capteurs sont embarqués sur des dispositifs mobiles tels que des véhicules, ou sur des animaux. En outre, un autre type de mobilité pourrait être pris en compte, qui est la mobilité de la station de base ou les deux types de dispositifs peuvent être mobiles simultanément. La mobilité est une question clé, elle entraîne un changement imprévisible et fréquent de topologie. Lorsque la mobilité est trop fréquente, elle ne peut être considérée comme un problème secondaire. Ainsi, la détection des voisins et la reconfiguration du réseau exige habituellement un nombre important de messages de contrôle de la topologie, donc une dépense importante d'énergie. Le réseau peut être homogène (même capacité de calcul, de communication et d'énergie) ou hétérogène (différents types de capteurs ou par exemple certains nœuds capteurs plus puissants utilisés pour router les données vers la station de base). Il peut y avoir un seul nœud puits, ou plusieurs. En effet, il y a beaucoup de scénarios envisageables et des protocoles génériques ne pourront pas être efficaces dans tous les cas. La tendance est au développement de protocoles dédiés à une application particulière. Les nœuds capteurs sont intrinsèquement liés aux contraintes énergétiques, de calcul, de capacité de stockage et de communication. Toutefois, la contrainte énergétique est considérée comme une contrainte plus forte car la ressource énergétique est un point important dans la possible défaillance du réseau. Les protocoles de routage doivent avoir une attention particulière sur la gestion des ressources. Les contraintes de conception et les défis des protocoles de communication dans les réseaux de capteurs sans fil sont comme suit :

2.2.1 Énergie

Un nœud capteur consomme de l'énergie durant la perception, le traitement et la communication des données. Si un nœud capteur épuise sa quantité d'énergie limitée (tombe en panne ou meurt) la topologie du réseau change. Comme les réseaux de capteurs sans fil sont des réseaux multi-sauts, les nœuds capteurs morts peuvent désactiver le réseau entier. Par conséquent, la consommation efficace d'énergie est un facteur critique pour les réseaux de capteurs sans fil. Les nœuds capteurs doivent fonctionner pour de longues périodes de temps avec la quantité d'énergie disponible dans les batteries. C'est pour cela qu'il est nécessaire d'appliquer des techniques de conservation d'énergie dans la communication et le traitement des données. Les protocoles de communication développés pour les réseaux de capteurs sans fil doivent être les plus simples que possible afin de

consommer le minimum d'énergie. Les protocoles de communication doivent distribuer la consommation d'énergie équitablement entre les nœuds capteurs afin de maximiser la durée de vie du réseau. D'autres techniques peuvent être utilisées, comme par exemple, la réduction de la taille des paquets de données ainsi que le nombre de paquets routés dans le réseau et l'évitement des sources de dissipation d'énergie.

2.2.2 Calcul

Les processeurs embarqués dans les nœuds capteurs ne sont pas assez puissants comme ceux trouvés dans les réseaux filaires ou même les réseaux ad hoc. Donc, les protocoles de communication développés doivent prendre en considération ces limites.

2.2.3 Communication

Les spécificités et caractéristiques du médium sans fil et des réseaux de capteurs doivent être prises en considération lors de la conception des protocoles de communication. Les nœuds capteurs sont souvent limités en termes de bande passante et de puissance de transmission, ce qui pose des contraintes pour les communications inter-nœuds.

2.2.4 Scalabilité

Le nombre de nœuds capteurs déployés peut être de l'ordre de la centaine ou du millier. Les performances du réseau ne doivent pas chuter lorsque le nombre de nœuds augmente. Pour cette raison, les protocoles de communication doivent supporter la scalabilité ou le passage à l'échelle i.e. fonctionner efficacement dans un réseau qui peut contenir un grand nombre de nœuds capteurs. Les protocoles de communication doivent, aussi, présenter un trafic de contrôle négligeable afin de ne pas perturber le trafic de données. Adopter une vue plate du réseau et attribuer des rôles égalitaires à tous les nœuds présentent des limitations au passage à l'échelle, vu la croissance du trafic de contrôle avec le nombre de nœuds. Dans ce contexte, le concept de clustering peut être mis à profit afin de faire face aux problèmes de passage à l'échelle et accroître les performances du système. La structuration d'un réseau permet de rendre son exploitation plus aisée. Plusieurs mécanismes de clustering ont vu le jour pour organiser un réseau de grande envergure et donner une vue abstraite de ce dernier, disjointe de la topologie radio réelle.

2.3 Protocoles d'accès au canal

Les contraintes spécifiques des réseaux de capteurs sans fil rendent les méthodes d'accès sans fil classiques, comme celles de la norme IEEE 802.11, inadaptées et inefficaces. La contrainte la plus forte des réseaux de capteurs sans fil est la limitation en ressources, que ce soit en termes de capacité de calcul, d'espace mémoire ou de ressources énergétiques. Cette contrainte est souvent ignorée par les protocoles MAC sans fil traditionnels qui essaient d'augmenter le débit, minimiser la latence et être robustes par rapport à la mobilité. Les nouveaux protocoles MAC proposés essaient de prendre en considération les limitations des réseaux de capteurs. Une étude des protocoles d'accès au canal dans les réseaux de capteurs peut être trouvée dans [17]. Dans cette section, nous allons présenter les méthodes d'accès des réseaux de capteurs sans fil les plus citées dans la littérature.

Les protocoles d'accès au canal peuvent être classés en trois familles principales : les protocoles MAC basés sur la contention (basés sur un évitement de collision probabiliste), les protocoles MAC sans contention (basés sur un séquençement temporel, etc.) et les protocoles hybrides. Dans la première famille, tous les nœuds accèdent au canal en concurrence, il y a possibilité de collisions lorsque plus de deux nœuds accèdent au canal simultanément. Au contraire, dans la deuxième famille, chaque nœud possède son propre intervalle de temps ou sa propre fréquence de transmission. Les nœuds accèdent au canal sans concurrence et il n'y a jamais de collisions. Les protocoles hybrides combinent les deux autres solutions.

2.3.1 Protocoles MAC sans contention

Les protocoles MAC sans contention, appelés protocoles basés sur la réservation ou protocoles ordonnancés, sont efficaces en consommation d'énergie parce qu'ils évitent les collisions et l'overhearing. Ils ne permettent pas les communications pair-à-pair et exigent généralement aux nœuds capteurs de former des clusters. La communication inter-cluster est réalisée par les approches : TDMA, FDMA et CDMA. L'utilisation de FDMA (Frequency Division Multiple Access) pour les communications intra-cluster évite les collisions, mais elle augmente la consommation d'énergie des nœuds capteurs à cause du besoin de circuits additionnels pour communiquer dynamiquement avec les différents canaux radio. De même, CDMA (Code Division Multiple Access) évite les collisions mais les calculs consomment suffisamment d'énergie [17], alors que TDMA (Time Division Multiple Access) essaie d'optimiser le procédé d'attribution des slots dans le but de minimiser la consommation d'énergie. Les protocoles MAC appliquant un séquençement temporel découpent le temps en slots, chaque slot de temps est alloué (localement) à un

seul nœud pour lui garantir l'accès au canal afin qu'il puisse transmettre ses données. Ces protocoles sont généralement économes en énergie car ils évitent les collisions, ils limitent l'idle listening et l'overhearing en mettant les nœuds en mode sommeil durant les slots de temps réservés aux autres nœuds. De plus, ils garantissent un délai borné de bout-en-bout si un algorithme d'allocation prend en compte les caractéristiques du trafic.

L'aspect centralisé et le besoin d'une synchronisation rendent ce type de protocoles rigide et non-adapté pour les topologies dynamiques et mobiles. Pour des raisons de simplicité d'implémentation, la plupart des protocoles **MAC** sans contention utilisent la division temporelle, ou **TDMA**, où il n'y pas de collision. Cependant, l'utilisation de **FDMA**, ou encore **CDMA**, par les nœuds capteurs reste encore discutable [6] à cause de la relative complexité des circuits associés et leur consommation énergétique.

2.3.2 Protocoles MAC avec contention

La technique d'accès basée sur la compétition (contention-based) consiste, pour les nœuds partageant le même canal, à écouter le canal et envoyer leurs données lorsque ce dernier est libre. Le protocole le plus connu est **CSMA** (Carrier Sense Multiple Access) qui est à la base de IEEE 802.11. Pour préserver leur énergie, les nœuds se synchronisent pour écouter le canal seulement lorsque leurs voisins sont en train de transmettre et se mettre en veille lorsqu'il n'y a pas d'activité sur le canal. Les avantages de l'accès par compétition par rapport à **TDMA** sont : la non-obligation d'avoir un nœud contrôleur qui affecte les intervalles de transmission aux nœuds ; Ils permettent la communication pair-à-pair, et n'exigent aucune synchronisation. Une meilleure adaptation aux flux en rafales et de meilleurs délais. Les protocoles d'accès au médium basés sur la contention, sont plus flexibles aux changements de la topologie. Néanmoins, ils n'utilisent pas souvent efficacement les ressources à cause des collisions et de l'écoute inutile. Le principal inconvénient est la forte consommation énergétique, car les nœuds dépensent beaucoup d'énergie dans l'écoute du canal et dans les retransmissions en cas de collisions, ces dernières étant plus probables lorsque le réseau est dense à cause, notamment, du problème du nœud caché.

2.3.3 Protocoles hybrides

Une troisième famille de protocoles **MAC** propose de combiner les deux méthodes : **TDMA** et **CSMA/CA**. Ainsi, ces protocoles essaient d'avoir les avantages des deux méthodes en alternant les deux dans le temps ou en les combinant d'une manière intelligente.

2.4 Protocoles de Routage

Le routage est l'un des domaines de recherche principaux et les plus attractifs dans les réseaux de capteurs sans fil. L'objectif principal de ces recherches est de permettre le routage à moindre coût en énergie tout en étant robuste. Les solutions de routage proposées pour les réseaux ad hoc sont adaptées aux situations nécessitant une communication entre deux nœuds arbitraires du réseau. Ils sont conçus pour supporter les demandes d'établissement de routes, sans considérer les modèles de communication spécifiques dans les réseaux de capteurs. Les réseaux de capteurs sans fil diffèrent des autres types de réseaux sans fil par le fait que, dans la plupart des cas, les données du nœud capteur doit être envoyées à un seul nœud puits (station de base). Donc, les communications sont essentiellement unidirectionnelles vers un unique puits ou un nombre limité de destinations. Par conséquent, le processus de routage au sein des réseaux de capteurs se fait dans le sens de communication des nœuds capteurs vers la station de base. De plus, les protocoles de routage ad hoc ne s'appliquent pas aux réseaux de capteurs sans fil à cause de leur consommation d'énergie élevée. Dans les réseaux de capteurs sans fil, le routage est un service très important car il doit permettre l'arrivée des données à la station de base avec le minimum de pertes et de dissipation d'énergie. Récemment, de nombreux nouveaux protocoles de routage ont été spécifiquement conçus pour les réseaux de capteurs sans fil où l'énergie est un facteur essentiel. Une étude détaillée des techniques de routage dans les réseaux de capteurs peut être trouvée dans [4] [7]. Les deux principales classes de protocoles utilisées dans les réseaux de capteurs sans fil, s'appuient sur la technique de routage multi-sauts, le clustering ou une hybridation des deux. Selon la structure du réseau, Al-Karaki et al. ont classé les protocoles de routage en trois catégories [7] : à plat (orientés données), hiérarchiques (basés sur le clustering) et basés sur la localisation (orientés position géographique). Les protocoles de routage à plat considèrent que tous les nœuds capteurs sont identiques, c'est à dire ont les mêmes fonctionnalités. Les protocoles hiérarchiques fonctionnent en confiant des rôles différents aux nœuds capteurs. Certains nœuds sont sélectionnés pour exécuter des fonctions particulières. Par exemple, certains nœuds vont avoir un rôle continu ou alternatif dans l'agrégation et la transmission des données. En se basant sur cette notion de leader lors des transmissions, un nœud peut être une passerelle pour un ensemble de nœuds. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer par les passerelles pour atteindre le nœud destination.

La communication des données des nœuds capteurs à la station de base peut prendre quatre formes. Dans les architectures à plat, les nœuds capteurs peuvent communiquer directement avec la station de base en utilisant une forte puissance (Figure 2.1 (a)), ou via

un mode multi-sauts avec des puissances très faibles (Figure 2.1 (b)), alors que dans les architectures hiérarchisées, le nœud représentant le cluster, appelé cluster-head, transmet directement les données à la station de base (Figure 2.1 (c)), ou via un mode multi-saut entre les cluster-heads (Figure 2.1 (d)).

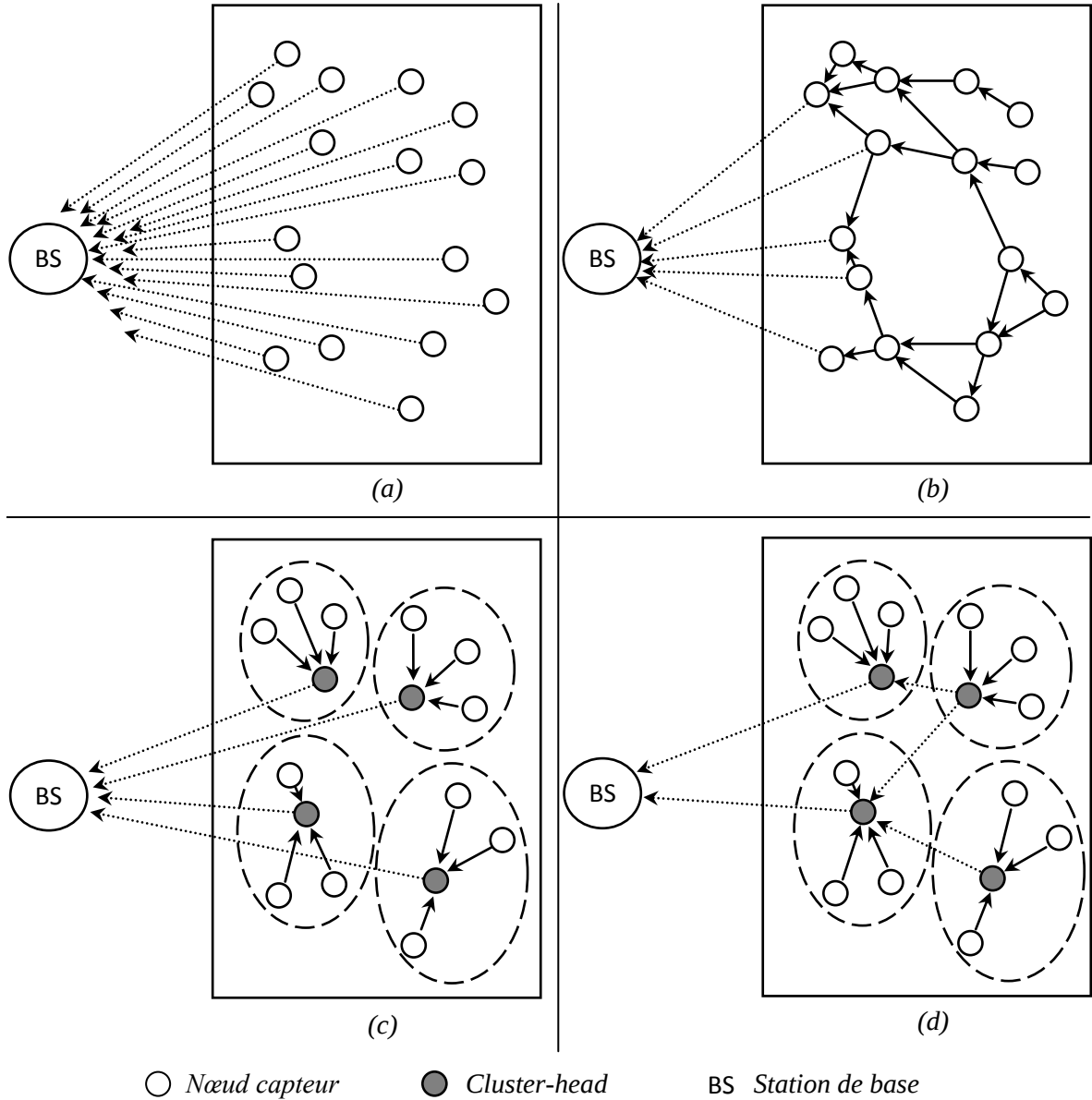


FIGURE 2.1 – Communication de données dans un réseau de capteurs sans fil

2.4.1 Protocoles de routage à plat

Dans les protocoles de routage à plat, les nœuds capteurs jouent le même rôle et collaborent ensemble pour effectuer leur tâche. A cause du grand nombre de nœuds capteurs, les protocoles à plat sont souvent orientés données (data-centric). La station de

base envoie des requêtes à certaines régions et attend de recevoir les données des nœuds capteurs localisés dans les régions sélectionnées. Ce ne sont pas des nœuds spécifiques qui sont interrogés sur les données mais plutôt le réseau, en tant qu'entité, qui est interrogé sur un attribut particulier du phénomène surveillé. Par exemple, le réseau pourrait être interrogé sur "les zones où la température dépasse 30 degrés Celsius". Pour cela, l'adressage, ou le nommage, est basé sur les attributs d'un phénomène. Ce type de routage utilise généralement la diffusion (flooding) pour propager l'information relative à une certaine donnée. Les nœuds intéressés par une information ou une catégorie de données spécifique envoient une requête qui est propagée par flooding sur tout le réseau et les nœuds possédant l'information requise répondent en propageant cette information sur le réseau. Les nœuds qui ne sont pas intéressés par l'information en question devront aussi participer au routage même s'ils n'ont pas déclaré leur intérêt pour cette information. Pour éviter un trop grand volume de données acheminées des nœuds vers le nœud de contrôle, certains nœuds peuvent faire une fusion de données provenant de plusieurs voisins avant de router l'information vers le nœud de contrôle. Le flooding a cependant plusieurs inconvénients connus comme l'implosion, qui survient lorsque les N voisins d'un nœud A reçoivent tous de A un message m qu'ils retransmettent à un voisin commun B . B reçoit alors N copies du même message m . Pour être efficace dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil, le flooding doit être intégré au sein d'un protocole qui tient compte de l'énergie résiduelle des nœuds et de la corrélation spatiale. Le routage sera alors sélectif en fonction de cette énergie restante.

Pour éviter l'implosion, il existe une variante du flooding qui est le bavardage (gossiping) et qui consiste à sélectionner au hasard un seul voisin à qui les données seront acheminées. L'inconvénient évident de ce protocole est la lenteur d'arrivée du message à son destinataire final, surtout si le réseau est dense. Une autre variante du flooding classique est la famille de protocoles **SPIN** (Sensor Protocol for Information via Negotiation) [28]. C'est une famille de protocoles de routage qui améliore la conservation de l'énergie des nœuds au niveau du routage. Dans SPIN, un nœud qui émet ou transfère des données propose à ses voisins une image de ces données (méta-donnée) avant de les émettre, via un message ADV. Le (ou les) voisin qui serait intéressé à recevoir ces données le fera savoir au nœud émetteur par un message REQ. Ensuite, les nœuds intéressés recevront les données via un message DATA. L'avantage de SPIN est d'éviter la surcharge du réseau et de sauvegarder l'énergie des nœuds qui ne sont pas intéressés à recevoir certaines données, surtout si celles-ci sont volumineuses. Toujours dans le but d'éviter l'implosion et la surcharge du réseau par des envois systématiques à tous les voisins, la diffusion orientée (Directed Diffusion) [33] est un paradigme de routage orienté données qui consiste à établir un chemin pour chaque information d'intérêt annoncée et diffusée

par le nœud de contrôle. L'information d'intérêt pourrait être, par exemple, les zones où un mouvement a été détecté. Une première étape consiste à établir le chemin associé à cette information. Ensuite, lorsqu'un capteur répond à cet intérêt (dans notre exemple, un capteur qui détecte un mouvement), il véhicule l'information via le chemin associé à cet intérêt. Ce chemin est rafraîchi à chaque période de temps et il a une durée limitée.

SPIN [28] et Directed Diffusion [33] sont deux protocoles de routage à plat. SPIN économise l'énergie en éliminant la transmission des données redondantes dans le réseau alors que Directed Diffusion sélectionne les chemins qui minimisent la consommation. Cependant, les deux protocoles SPIN et Directed Diffusion ont le même problème de déséquilibre i.e. la charge énergétique n'est pas distribuée équitablement entre les nœuds capteurs du réseau. Les nœuds capteurs proches de la station de base consomment plus d'énergie que les nœuds capteurs éloignés de la station de base. Un autre problème rencontré dans les architectures à plat est le passage à l'échelle. La majorité des protocoles de routage conçus pour les réseaux de capteurs ou les réseaux ad hoc de petite ou moyenne taille avec une faible mobilité de nœuds fournissent de bonnes performances. Cependant, lorsque le nombre de nœuds augmente ou que les nœuds sont mobiles, le trafic de contrôle prédomine les communications réelles. Ce qui conduit à une augmentation de la latence et à une explosion des tables de routage. Afin de pallier à ces limites, l'architecture hiérarchique s'est considérée comme l'une des solutions communément efficaces pour la diffusion et le routage dans les réseaux ad hoc et de capteurs.

2.4.2 Protocoles de routage hiérarchiques

Les protocoles de routage hiérarchiques [3] [4] [27] [45] se basent sur la subdivision des nœuds du réseau en clusters (grappes). Chaque cluster dispose d'un cluster-head (tête de grappe), élu ou désigné, qui constitue le routeur ou la passerelle pour tout le cluster, i.e. le nœud qui récolte, fusionne, filtre les données et les achemine à la station de base. Les cluster-heads peuvent former, eux aussi, un autre niveau de clusters ayant une tête, et ainsi de suite. Ceci donne au réseau une structure hiérarchique arborescente qui conserve l'énergie des nœuds et allège le réseau car les données suivent, dans un intervalle de temps donné, un seul chemin allant des nœuds vers les cluster-heads jusqu'à la station de base. Les données des nœuds d'un cluster, qui présentent généralement une corrélation spatiale et/ou temporelle, sont fusionnées et filtrées au niveau du cluster-head, ce qui diminue le taux de données routées vers la station de base. Comme le traitement et la transmission des données consomment de l'énergie, les nœuds d'un même cluster ou du réseau en entier peuvent occuper à tour de rôle la fonction de cluster-head, pour équilibrer la consommation d'énergie entre eux, comme proposé par Heinzelman et al. [26].

Les protocoles hiérarchiques sont souvent divisés en deux phases : phase de clustering et phase de transmission de données. Dans la phase de clustering, on choisit les cluster-heads et on crée les clusters. La sélection des cluster-heads s'effectue en utilisant différentes métriques comme l'énergie résiduelle et le degré des nœuds. La formation de clusters s'effectue en groupant les nœuds capteurs autour des cluster-heads. A titre d'exemple, les nœuds capteurs peuvent choisir le cluster-head le plus proche qui nécessite une quantité d'énergie minimale de communication. Dans la phase de transmission de données, comme le nom l'indique chaque nœud capteur envoie les données collectées à son cluster-head qui s'occupe à son tour d'envoyer les données de tous les membres de son cluster à la station de base soit directement soit en utilisant une architecture multi-sauts. Dans le cas d'une transmission multi-sauts les données sont envoyées d'un cluster-head à un autre jusqu'à atteindre la station de base.

LEACH [26] [27] est un protocole basé sur le clustering (cluster-based protocol). La conservation d'énergie dans LEACH est effectuée par trois techniques : la rotation aléatoire des cluster-heads, la mise en veille de la radio des nœuds capteurs et l'agrégation de données. PEGASIS [39] est un autre protocole hiérarchique. Ce protocole évite la formation de clusters et utilise les chaînes pour transmettre les données à la station de base. LEACH et PEGASIS sont efficaces en termes d'énergie. Cependant, ces deux protocoles supposent que les nœuds capteurs sont capables de communiquer les uns avec les autres directement, une caractéristique qui ne peut pas être disponible pour de nombreux réseaux de capteurs. Nous étudions plus en détail les mécanismes de formation de clusters et leurs avantages en termes de conservation de l'énergie dans le chapitre suivant.

2.4.3 Protocoles de routage basés sur la localisation

Les protocoles orientés position [4] [6] [7] supposent connues les positions des nœuds dans un repère fixe et le réseau de capteurs sans fil est représenté par un graphe dont les nœuds représentent les nœuds capteurs et les arcs les connexions entre les nœuds qui peuvent communiquer directement entre eux. Le routage est alors effectué en calculant, entre chaque paire de nœuds, le chemin le plus court en utilisant comme métrique l'énergie consommée dans la communication. Le principal inconvénient des protocoles de routage orientés position géographique est la connaissance de la position de tous les nœuds capteurs. Deux moyens existent pour estimer la position d'un nœud capteur : l'utilisation d'un [GPS](#) ou la localisation à l'aide de nœuds de référence dont la position est connue d'avance. Cette deuxième solution est réaliste mais présente des erreurs de précision parfois élevées. La première solution est très coûteuse et irréaliste dans le cas d'un réseau de capteurs sans

fil à cause du coût et du volume élevés d'un appareil **GPS** et de sa grande consommation d'énergie. Une alternative consiste à doter seulement un sous-ensemble de nœuds de **GPS** et déterminer la position des autres nœuds en utilisant différentes techniques.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux protocoles de communication. La conception des ces protocoles est confrontée à de nombreux problèmes. Après la description des contraintes de conception, nous avons présenté les types de protocoles **MAC** proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Ces protocoles sont soit basés sur un séquençement temporel, basés sur un évitement de collision probabiliste ou hybrides. Dans la littérature, les protocoles de routage ont été classifiés selon différents critères : structure du réseau (protocoles à plat, hiérarchiques et basés sur la localisation géographique), fonctionnement du protocole (protocoles basés sur la négociation, basés sur les requêtes, basés sur la **QoS** et protocoles multi-chemins), établissement de la route (protocoles proactifs, réactifs et hybrides), etc. Dans ce chapitre, nous avons présenté la classification selon la structure du réseau.

Les protocoles de routage utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil s'appuient principalement sur la technique de clustering. Les efforts de recherche ont été concentrés sur la définition d'une topologie hiérarchique basée sur les clusters parce qu'elle est beaucoup plus efficace que la topologie à plat. Le chapitre suivant présente le clustering, ses avantages et son impact sur l'équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs.

Chapitre 3

Clustering et équilibrage de charge

3.1 Introduction

Le déploiement à grande échelle des nœuds capteurs sans fil à ressources énergétiques limitées nécessite une organisation efficace du réseau dans le but d'équilibrer la charge et prolonger la durée de vie du réseau. Le clustering est une approche très efficace pour l'organisation des réseaux de capteurs sans fil. Le but de clustering est de fournir une vue logique plus efficace que la vue physique afin d'améliorer la durée de vie et atteindre l'objectif de scalabilité des réseaux de capteurs sans fil. Le clustering consiste à subdiviser le réseau en sous-ensembles de nœuds capteurs, appelés clusters. Les nœuds capteurs proches géographiquement sont groupés en sous-ensembles ayant chacun un nœud désigné comme cluster-head et des nœuds membres connectés au cluster-head. Le regroupement autour d'un cluster-head s'impose naturellement afin de limiter la consommation d'énergie des nœuds capteurs. Les nœuds membres transmettent leurs données au cluster-head qui, à son tour, les achemine jusqu'à la station de base, soit directement, soit en multi-sauts via des passerelles ou d'autres cluster-heads voisins. Par conséquent, le nombre de messages envoyés par agrégation/fusion des informations des nœuds capteurs ainsi que les portées de transmission peuvent être réduits. Dans ce chapitre nous abordons la problématique de clustering et d'équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs sans fil.

3.2 Clustering

Le clustering dans les réseaux de capteurs sans fil consiste à choisir un ensemble de nœuds capteurs pour être cluster-head et à rassembler les autres nœuds capteurs en clusters (grappes) autour de ces cluster-heads. Les nœuds capteurs ne doivent pas être trop loin de la tête de leur cluster. Le choix des cluster-heads peut se faire aléatoirement, selon le degré de connectivité des nœuds (nombre de voisins), selon l'énergie résiduelle

des nœuds capteurs ou en utilisant une combinaison de métriques. Les cluster-heads regroupent les nœuds capteurs pour former des clusters. Chaque nœud capteur appartient à un seul cluster et communique avec la station de base seulement via son cluster-head. Par conséquent, le trafic de données généré à chaque nœud capteur peut être envoyé via les cluster-heads à la station de base. Le routage s'effectue de manière hiérarchique, qui diffère selon qu'on route dans un même cluster (intra-cluster) ou vers un autre (inter-cluster). On utilise d'habitude une approche proactive pour les messages internes aux clusters, et une approche réactive pour les autres. Le clustering est une technique efficace pour réduire la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil. Les cluster-heads peuvent effectuer certaines opérations comme le filtrage et l'agrégation des données collectées. L'agrégation des informations collectées par les membres du cluster permet de limiter la quantité de données transmises à la station de base et ainsi alléger la bande passante, diminuer la charge de traitement sur la station de base et sauvegarder l'énergie des nœuds capteurs. Par ailleurs, l'organisation en clusters permet de mieux coordonner et ordonnancer les tâches des nœuds capteurs dans un réseau de capteurs sans fil. En effet, Les cluster-heads peuvent organiser les instants de transmission des nœuds capteurs de leur cluster respectif afin d'éviter les collisions et par conséquent les retransmissions [3]. Les cluster-heads peuvent également ordonnancer l'activité des nœuds capteurs membres de leur cluster en ordonnant à certains nœuds capteurs de se mettre en veille. La formation de clusters offre des économies d'énergie importantes [4] [30] puisque seules les cluster-heads sont impliquées dans les tâches de collecte, routage et agrégation des données. De plus, la structuration hiérarchique en clusters allège la bande passante et permet sa réutilisation, ce qui contribue à augmenter la capacité du réseau.

Dans le cas général, trouver un regroupement optimal de nœuds capteurs autour de nœuds cluster-heads est un problème combinatoire NP-complet [52]. La recherche de la solution optimale nécessite l'évaluation de toutes les possibilités de clusters possibles. Parmi lesquelles certaines configurations sont trivialement non-optimales et peuvent ainsi ne pas être examinées. La recherche d'une solution optimale n'est donc possible que pour des réseaux de très faible effectif. Toutefois, l'utilisation d'heuristiques classiques d'optimisation combinatoire telles que le recuit simulé ou les algorithmes génétiques restent envisageables mais demeurent difficilement adaptables pour une utilisation distribuée. Un serveur central avec connaissance de la position des nœuds capteurs, matrice de coût et des énergies résiduelles doit réaliser le calcul des clusters.

3.3 Classification des algorithmes de clustering

Plusieurs approches peuvent être suivies pour la formation des clusters : des algorithmes centralisés ou distribués, les cluster-heads peuvent être élus par les nœuds capteurs ou désignés d'avance par le concepteur du réseau, ils peuvent faire partie de l'ensemble des nœuds capteurs ou d'un ensemble séparé de nœuds capteurs munis de plus grandes ressources, ils peuvent demeurer fixes dans le temps ou dynamiques. Les réseaux de capteurs peuvent être homogènes (constitués de dispositifs aux capacités physiques identiques) ou hétérogènes (les nœuds peuvent être d'un type parmi plusieurs ayant des capacités matérielles différentes, par exemple, des dispositifs plus complexes ayant des capacités de traitement et de communication supérieures à celles des nœuds ordinaires). Dans cette seconde approche, le réseau sera habituellement considéré comme hiérarchisé. Cette approche consiste à introduire un ensemble de nœuds plus coûteux et plus puissants, en créant une infrastructure qui décharge la majorité des nœuds simples à faible coût de plusieurs fonctions du réseau. Tandis que dans la première approche, la structure pourra être hiérarchisée par spécialisation logicielle permanente ou temporaire de certains nœuds (élection d'un cluster-head). Dans ce dernier cas le cluster-head n'est qu'un nœud capteur simple élu périodiquement.

Plusieurs algorithmes centralisés ou distribués ont été utilisés pour la formation efficace de clusters dans les réseaux de capteurs sans fil [4]. Les algorithmes centralisés de formation de clusters ont l'avantage de se baser sur une vue globale du réseau pour générer des solutions optimales. Ces algorithmes évitent le calcul au niveau des nœuds capteurs, ce qui nécessite la mise à jour constante des informations concernant ces nœuds au niveau de la station de base. La mise à jour périodique est coûteuse en termes de messages de contrôle et implique une surcharge du réseau et une consommation supplémentaire d'énergie. En se basant sur les informations collectées à partir des nœuds capteurs, la station de base exécute un algorithme génétique ou une autre technique pour élire les cluster-heads et former les clusters. Les algorithmes centralisés peuvent créer de meilleurs clusters à partir des nœuds capteurs que ceux créés en utilisant une approche distribuée. Cependant, les approches distribuées sont tolérantes aux pannes, parce que les nœuds ne sont pas dépendants sur d'autres nœuds dans le réseau et il n'y a pas de nœuds qui sont plus importants que d'autres nœuds. Les approches distribuées sont moins coûteuses en nombre de messages de contrôle et plus adaptés au passage à l'échelle (scalability), malgré leurs solutions sous-optimales dues au fait que les décisions sont prises localement, par chaque nœud capteur, à partir des informations locales ou recueillies de son voisinage. Certaines approches distribuées se basent sur des méthodes probabilistes où les cluster-heads sont

sélectionnés aléatoirement, sans tenir compte des paramètres du réseau. Ceci n'assure pas une bonne répartition des clusters et entraîne l'épuisement rapide des batteries des cluster-heads. Dans d'autres approches distribuées rencontrées dans la littérature [27] [61], l'élection des cluster-heads est généralement basée sur l'énergie résiduelle des nœuds capteurs et leur degré respectif. Lorsque les nœuds capteurs se basent sur une vue limitée de leurs voisins directs pour prendre leur décision de s'auto-élire cluster-head, ceci fait qu'en général les clusters formés ne sont pas efficaces.

3.4 Équilibrage de charge

L'équilibrage de charge consiste à assurer l'utilisation des ressources de la meilleure façon. Il vise à garantir qu'aucune machine n'est sous chargée ou surchargée et à instaurer une charge uniforme sur toutes les machines. Comment répartir le travail est l'une des questions qui forment le cœur de la problématique d'équilibrage de charge. Dans ce qui suit nous présentons la problématique d'équilibrage dans les réseaux de capteurs sans fil.

Le problème d'équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs sans fil a des exigences uniques qui le distinguent du problème classique d'équilibrage de charge dans les systèmes distribués ou même les réseaux ad hoc. Dans les systèmes distribués classiques, un nœud peut être soit un serveur ou une source, mais pas les deux. Un nombre fixe de serveurs est connu par chaque source dans le système. Dans un réseau de capteurs sans fil, chaque nœud peut agir à la fois comme source ou serveur (cluster-head), ce qui motive le recours à des algorithmes efficaces pour sélectionner les serveurs en fonction des objectifs du système comme par exemple la maximisation de la durée de vie. De manière générale, un nœud capteur ne connaît que les serveurs qui sont à sa portée, ce qui implique que la réalisation des objectifs ne peut pas toujours être garantie d'une manière globale, mais peut être approchée par des décisions locales intelligentes. Un nœud capteur peut tomber en panne si ses ressources énergétiques sont épuisées, ce qui motive le besoin de tourner le rôle de serveur parmi tous les nœuds capteurs pour l'équilibrage de charge. Pour un réseau de capteurs sans fil, on peut définir une stratégie d'équilibrage de charge sur trois niveaux différents : niveau détection, niveau calcul et niveau communication. Nous nous intéressons dans ce mémoire à l'équilibrage de la charge de communication. L'idée de base est de répartir la charge entre les nœuds capteurs en assurant l'épuisement uniforme des batteries des nœuds.

3.4.1 Élection des cluster-heads

La décision pour être cluster-head peut dépendre de plusieurs paramètres. On peut utiliser une métrique spécifique ou bien un poids qui représente une combinaison de quelques métriques telle que la quantité d'énergie disponible au niveau du nœud capteur, le degré de connectivité, la puissance de transmission, etc. L'équilibrage de charge est un facteur essentiel pour les algorithmes de clustering. Les nœuds capteurs ayant une énergie résiduelle élevée devraient avoir plus de chance de devenir cluster-head. De cette façon, les nœuds avec plus d'énergie rempliront les fonctions de cluster-head intensives en énergie. En outre, plus de nœuds capteurs doivent rejoindre le cluster-head à énergie élevée. D'autres algorithmes de clustering essaient d'équilibrer la taille des clusters au lieu de la distribution d'énergie.

3.4.2 Nombre de clusters

Dans les protocoles de clustering, un nombre de nœuds cluster-heads optimal permet d'optimiser la dépense en énergie du réseau. Comment déterminer le nombre optimal de clusters pour un réseau de capteurs donné ? C'est un problème clef dans un environnement contraint en énergie comme les réseaux de capteurs. Un nombre de clusters égal à 0 ou 100% représente une communication directe avec la station de base. Supposons qu'il y a un nombre optimal de nœuds N qui devraient être cluster-heads. S'il y a peu de cluster-heads i.e. moins de N , certains nœuds dans le réseau sont obligés de transmettre leurs données sur de longues distances pour atteindre le cluster-head, ce qui provoque l'énergie consommée d'augmenter. Comme le cluster-head est responsable de l'agrégation des données de ses membres de clusters, un seul message doit être envoyé du cluster à la station de base. S'il y a plusieurs cluster-heads dans ce cas plus de N , il y aura plusieurs cluster-heads qui transmettent les données à la station de base i.e. plus de messages envoyés et moins d'agrégation de données effectuée. Si la station de base est située loin des nœuds capteurs, la minimisation du nombre de clusters permet de réduire la consommation énergétique. Le système peut déterminer, a priori, le nombre optimal de cluster-heads ou clusters. Cela dépendra de plusieurs paramètres, tels que la topologie du réseau et les coûts relatifs de calcul par rapport la communication.

3.4.3 Position des cluster-heads

La consommation d'énergie peut être distribuée entre les nœuds capteurs en positionnant les cluster-heads au centre des clusters.

3.4.4 Taille des clusters

Un nœud capteur peut se situer dans la portée de plusieurs cluster-heads. Ce nœud capteur doit alors choisir de rejoindre l'un des clusters. Certaines approches ne considèrent aucun équilibrage de charge. Par exemple, le nœud capteur choisit le cluster-head le plus proche en se basant sur la puissance du signal reçu. D'autres approches cherchent par cette décision à réaliser un équilibrage de charge. Le nœud capteur choisit le cluster dont le cluster-head est le moins chargé ou le plus doté en énergie. Un système qui ne considère pas l'équilibrage de charge entre les clusters peut avoir des clusters à haute densité et autres à très faible densité. Dans ce cas, le cluster-head à haute densité sera débordé par la charge de traitement et de communication, et alors épuisé d'énergie à un rythme beaucoup plus rapide que le cluster-head à faible densité. C'est pour cette raison que de nombreux algorithmes de clustering essaient d'équilibrer la taille des clusters.

3.4.5 Routage multi-chemins

Afin d'équilibrer la charge, plusieurs solutions ont été proposées, telles que les algorithmes de routage multi-chemins, qui permettent de distribuer le trafic sur plusieurs chemins différents, tout en tenant compte de l'état des nœuds intermédiaires composant les différents chemins.

3.4.6 Rotation des cluster-heads

Le rôle des nœuds cluster-heads est de collecter les données de leurs nœuds membres et les transmettre à la station de base. Pour certains modèles de réseaux de capteurs sans fil, il y a des nœuds cluster-heads à haute énergie à travers lesquels les nœuds capteurs limités en énergie peuvent communiquer avec la station de base. Un cluster-head consomme beaucoup d'énergie car il est utilisé de manière intensive. Par conséquent, Si les cluster-heads sont choisis parmi des simples nœuds capteurs limités en ressources énergétiques et les clusters sont formés tout au long de la durée de vie du réseau comme dans les algorithmes de clustering statique, il est facile de voir que les nœuds capteurs choisis pour être cluster-heads mourraient rapidement, ce qui termine la vie utile de tous les nœuds appartenant à ces clusters. Par conséquent, le clustering statique n'est pas optimal pour les réseaux de capteurs sans fil. Comme les cluster-heads consomment plus d'énergie que les nœuds capteurs réguliers, il est important de disposer d'un mécanisme efficace de rotation des cluster-heads [27].

Afin de diviser la charge sur plusieurs nœuds capteurs, les cluster-heads ne sont pas fixes, plutôt, ce rôle est pris par différents nœuds à des intervalles de temps différents.

Ainsi, un ensemble de nœuds capteurs C pourraient être cluster-heads à un temps t_1 , mais au temps $t_1 + d$ un nouvel ensemble de nœuds capteurs C' deviennent cluster-heads. Certaines approches changent les cluster-heads et les membres correspondant en se basant sur la connectivité des nœuds, l'énergie résiduelle de la batterie, etc. D'autres approches proposent de changer les cluster-heads sans changer les membres des clusters i.e. tourner le rôle de cluster-head entre les membres du même cluster. Cependant, le clustering et le re-clustering ne sont pas une fin en soi. Malgré les avantages de la rotation du rôle de cluster-head, le changement fréquent de la topologie des clusters est indésirable car il impose une surcharge considérable.

3.5 Algorithmes de clustering

De nombreux algorithmes de clustering ont été proposés dans la littérature pour les réseaux ad hoc, leur objectif est de générer des clusters stables dans des environnements avec des nœuds mobiles. Beaucoup de ces techniques se soucient surtout sur l'accessibilité des nœuds et la stabilité des routes, sans trop se soucier sur les objectifs de conception critiques des réseaux de capteurs sans fil tels que la longévité et la couverture du réseau. Récemment, plusieurs algorithmes de clustering ont été spécifiquement proposés pour les réseaux de capteurs sans fil et ont généralement le prolongement de la durée de vie du réseau comme objectif principal. Dans cette section, nous présentons les principales techniques de clustering proposées pour les réseaux de capteurs dans la littérature. Une étude des algorithmes de clustering dans les réseaux de capteurs peut être trouvée dans [3].

3.5.1 LEACH

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [27] est l'un des premiers protocoles de clustering proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. **LEACH** est un protocole d'auto-organisation distribué et dynamique. Les nœuds s'organisent en clusters, où un seul nœud capteur agit comme station de base locale ou cluster-head. **LEACH** utilise la rotation aléatoire du rôle de cluster-head pour distribuer la charge équitablement entre les nœuds capteurs du réseau et ne pas épuiser l'énergie de certains nœuds. De plus, **LEACH** effectue l'agrégation de données dans chaque cluster afin de "compresser" la quantité de données à envoyer par les clusters à la station de base, ce qui réduit l'énergie consommée et améliore la durée de vie du réseau.

Les nœuds capteurs s'auto-élisent pour être cluster-heads avec une certaine probabilité.

Les cluster-heads informent tous les nœuds capteurs dans le réseau de leur élection en diffusant (broadcast) un message d'annonce. La formation des clusters se base sur la puissance du signal reçu (RSSI) par les nœuds capteurs. Chaque nœud capteur choisit le cluster-head le plus proche qui nécessite le minimum d'énergie de communication. Cependant, en cas de présence d'obstacles empêchant la communication entre deux nœuds capteurs physiquement proches (par exemple, un immeuble, un arbre, etc.), la communication avec un autre cluster-head situé plus loin, est plus facile, le nœud capteur choisira le cluster-head qui est spatialement éloigné mais proche du point de vue communication [27]. Après cette étape, les nœuds capteurs envoient des messages d'attachement aux cluster-heads choisis. Une fois tous les nœuds sont organisés en clusters, chaque cluster-head crée un ordonnancement TDMA pour les nœuds capteurs de son cluster en se basant sur le nombre de nœuds constituant le cluster et le diffuse à ses membres. Chaque nœud transmet ses données vers le cluster-head de son cluster pendant son intervalle de temps spécifié dans la table TDMA. Les nœuds éteignent leur radio en attendant leurs temps de parole (slot de transmission), ce qui minimise l'énergie consommée par les nœuds capteurs. Par contre, les cluster-heads laissent leur radio en état de marche pour recevoir toutes les données des nœuds appartenant à leur cluster. Les cluster-heads sont les seuls nœuds qui peuvent envoyer les données vers la station de base, ce qui sauvegarde l'énergie des autres nœuds capteurs. Une fois un cluster-head a reçu les données de tous les membres de son cluster, il effectue l'agrégation de données et ensuite transmet les données agrégées à la station de base. Puisque la station de base est généralement éloignée, cette transmission est une transmission à haute énergie. Cependant, comme il y a peu de cluster-heads, cela affecte un petit nombre de nœuds.

LEACH est exécuté en deux phases : la phase setup et la phase steady-state (Algorithme 3.1). Dans la première phase, les cluster-heads sont sélectionnés et les clusters sont formés, et dans la seconde phase, le transfert de données vers la station de base aura lieu. Durant la première phase, le processus d'élection des cluster-heads est déclenché pour choisir les futurs cluster-heads. Aucune négociation n'est nécessaire pour déterminer les cluster-heads. Chaque nœud capteur prend la décision de devenir cluster-head ou non indépendamment des autres nœuds dans le réseau en se basant sur le nombre d'itérations (round) au cours duquel le nœud a joué le rôle de cluster-head et sur une valeur prédéfinie du pourcentage optimal des cluster-heads dans le réseau. Un nœud capteur n prend une valeur aléatoire entre 0 et 1. Si cette valeur est inférieure à un seuil $T(n)$, le nœud se

déclare cluster-head. Le seuil $T(n)$ est calculé comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{Si } n \in G \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

où

P : pourcentage désiré des cluster-heads. $P = 0,05$.

r : round actuel.

G : ensemble des nœuds capteurs qui n'ont pas été cluster-heads durant les derniers $1/p$ rounds.

Algorithme 3.1 Pseudo-code décrivant le fonctionnement du protocole LEACH

//Phase Setup :

//Choisir les cluster-heads et créer les clusters.

pour chaque (nœud capteur N) **faire**

N choisit un nombre aléatoire r entre 0 et 1 ;

si ($r < \text{seuil } T(N)$) **alors**

N devient cluster-head ;

N diffuse un message pour annoncer son élection ;

sinon

N devient nœud régulier ;

N écoute aux messages d'annonce des cluster-heads ;

N choisit le cluster-head avec le signal le plus fort comme son cluster-head ;

N informe le cluster-head choisi et devient un membre de son cluster ;

fin si

fin pour

pour chaque (cluster-head CH) **faire**

CH crée un ordonnancement TDMA pour chaque membre du cluster ;

CH diffuse l'ordonnancement TDMA aux nœuds du cluster ;

fin pour

//Phase Steady State :

pour chaque (nœud régulier N) **faire**

N collecte des données de l'environnement ;

N transmet les données collectées au cluster-head durant son slot de temps ;

fin pour

pour chaque (cluster-head CH) **faire**

CH reçoit les données à partir des nœuds du cluster ;

CH agrège les données ;

CH transmet les données à la station de base ;

fin pour

Les auteurs de **LEACH** ont proposé une variante de ce protocole appelée (**LEACH-C**) [26]. **LEACH-C** est un algorithme centralisé, itératif, dans lequel la structure des clusters est calculée au niveau de la station de base en utilisant la méthode d'optimisation du recuit simulé. La station de base affecte dans chaque itération des rôles pour les différents nœuds du réseau : cluster-head ou nœud capteur simple. Ensuite, le fonctionnement continue de la même manière que pour **LEACH**.

3.5.2 TEEN

TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) [43] est une technique de clustering 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 H_T (hard threshold), qui est la valeur seuil du paramètre contrôlé (surveillé) et un seuil soft S_T (soft threshold) représentant une petite variation de la valeur du paramètre contrôlé. L'occurrence de cette petite variation S_T 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 réduira 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, un nœud surveille l'environnement de manière continue. Une fois la valeur captée a dépassé le seuil hard, le nœud transmet cette valeur et la stocke dans une variable interne, appelée SV (sensed value). Pour les prochaines valeurs captées, le nœud ne les transmet que si les deux conditions suivantes sont remplies : Si la valeur captée est supérieure au seuil hard H_T et diffère du SV d'une valeur égale ou plus grande que la valeur du seuil soft S_T . Puisque la transmission d'un message consomme plus d'énergie que la détection des données, alors la consommation d'énergie dans **TEEN** est moins important que dans les protocoles qui transmettent des données périodiquement tels que **LEACH**. Cependant, l'inconvénient principal de ce protocole est que, si les seuils H_T et S_T ne sont pas reçus, les nœuds ne communiqueront jamais, et aucune donnée ne sera transmise à l'utilisateur, ainsi la station de base ne connaît pas les nœuds qui ont épuisé leur énergie. **TEEN** n'est pas souhaitable pour les applications qui nécessitent des envois périodiques de données.

3.5.3 PEGASIS

L'idée principale de **PEGASIS** (Power-Efficient GAttering in Sensor Information Systems) [39] est de former une chaîne de nœuds capteurs de sorte que chaque nœud reçoive 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 un round-robin dans le but est de réduire l'énergie moyenne dépensée par un nœud durant une période (round). PEGASIS évite la formation des clusters et procure à un seul nœud dans la chaîne l'envoi de données à la station de base. Bien que l'overhead 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 overhead important en particulier dans les réseaux les plus utilisés. En outre, PEGASIS suppose que tout nœud est capable de communiquer directement avec la station de base. 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 réseaux de capteurs sans fil dont les nœuds sont immobiles. Son évaluation dans des environnements mobiles pourrait dégrader considérablement ses performances.

3.5.4 EEHC

EEHC (Energy-Efficient Hierarchical Clustering) [10] est un algorithme distribué de formation de clusters à un ou plusieurs niveaux de hiérarchie. Dans le cas d'un seul niveau de hiérarchie, chaque nœud capteur s'annonce à ses voisins éloignés de k sauts, comme cluster-head potentielle, avec une probabilité p . Ensuite, chaque nœud capteur se connecte au cluster-head le plus proche. Les nœuds capteurs qui ne reçoivent aucune annonce et qui ne sont pas cluster-heads deviennent alors des cluster-heads forcés. Dans le cas de la formation de clusters à plusieurs niveaux de hiérarchie, le même processus est appliqué, à l'unique exception que seuls les cluster-heads désignés participent au processus d'élection des cluster-heads de niveau supérieur.

3.5.5 HEED

HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering) [61] est un algorithme de clustering distribué. **HEED** sélectionne les cluster-heads selon un critère hybride regroupant l'énergie restante des nœuds et le coût de communication intra-cluster. Il vise à réaliser une

distribution uniforme des cluster-heads dans le réseau et à générer des clusters équilibrés en taille. Dans la phase d'initialisation de **HEED**, chaque nœud capteur n calcule sa probabilité CH_{prob} de devenir cluster-head. Cette probabilité est proportionnelle à son énergie résiduelle et à un taux prédéterminé de cluster-heads dans le réseau. Ainsi, un nœud n est élu comme cluster-head avec une probabilité CH_{prob} égale à :

$$CH_{prob} = C_{prob} \times \frac{E_{residual}}{E_{max}}$$

où

$E_{residual}$: énergie restante du nœud n .

E_{max} : énergie maximale de référence qui correspond à une batterie chargée (en général identique pour tous les nœuds).

C_{prob} : nombre optimal de clusters.

Durant la phase de répétition, chaque nœud capteur cherche le meilleur cluster-head dans son voisinage, pour se connecter à lui. Si un nœud capteur ne trouve aucun cluster-head dans son voisinage, il double sa probabilité CH_{prob} et la diffuse de nouveau à ses voisins. Puis, il cherche le meilleur cluster-head dans son voisinage et ainsi de suite. Le nœud capteur n arrête le processus soit lorsque $CH_{prob} = 1$ (le nœud capteur devient cluster-head), soit lorsqu'il trouve un cluster-head dans son voisinage.

3.5.6 DWEHC

DWEHC (Distributed Weight-based Energy-Efficient Hierarchical Clustering) [20] est un algorithme distribué de formation de clusters similaire à **HEED** [61]. Dans **DWEHC**, chaque nœud capteur calcule son score, fonction de son énergie résiduelle et de sa proximité de ses voisins. Dans un voisinage, le nœud capteur ayant le score le plus élevé est élu cluster-head et tous ses voisins pourront alors se connecter à lui. Ensuite, chaque membre non-cluster-head du voisinage cherchera le chemin multi-sauts ayant le coût cumulé le plus bas, pour atteindre un cluster-head, en passant par ses voisins non-cluster-head. Pour cela, ces voisins diffusent leurs coûts respectifs pour atteindre le cluster-head et le nœud capteur en question pourra alors décider s'il se connecte directement au cluster-head ou s'il passe par le chemin de moindre coût.

3.5.7 EESH

EESH (Energy-Efficient Strong Head clustering) [63] est un protocole de formation de clusters dans lequel les cluster-heads sont élus en fonction de leurs coûts, lesquels sont calculés à partir de leurs énergies résiduelles respectives, leurs degrés respectifs, les

distances les séparant de leurs voisins et les énergies résiduelles de ces derniers. Le nœud capteur ayant le coût le plus élevé est élu cluster-head. Le processus d'élection se termine lorsque chaque nœud capteur est soit élu cluster-head, soit connecté à un cluster-head voisin.

3.6 Conclusion

Dans un réseau de capteurs sans fil, le clustering consiste généralement à sélectionner un ensemble de cluster-heads à partir de l'ensemble des nœuds capteurs et à regrouper, ensuite, les nœuds capteurs restants autour des cluster-heads. Dans ce chapitre, nous avons présenté la problématique de clustering et donné une classification générale des algorithmes de clustering proposés pour les réseaux de capteurs : algorithmes dynamique et statique, algorithmes distribués et centralisés. Ensuite, nous avons discuté le problème d'équilibrage de charge dans les réseaux de capteurs et ses spécificités qui le distinguent du problème classique d'équilibrage de charge dans les systèmes distribués ou tout autre système. Enfin, nous avons présenté quelques algorithmes de clustering proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. L'étude de différents algorithmes de clustering nous a permis de développer un protocole de communication qui tire profits des avantages de ces algorithmes, évite ses inconvénients et améliore ses limitations. Le protocole que nous avons proposé est décrit et détaillé dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Protocole de communication hiérarchique

4.1 Introduction

De nombreux protocoles de communication ont été proposés spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil : protocoles de transmission multi-sauts (multi-hop), protocoles basés sur les clusters (clustering statique ou dynamique), etc. Plusieurs travaux ont montré l'impact de ces protocoles sur la dissipation d'énergie et l'équilibrage de charge et ont discuté les avantages et les inconvénients de l'utilisation de chacune de ces approches [26] [27]. En analysant les avantages et les inconvénients de ces différents protocoles, nous avons proposé un protocole de communication basé sur les clusters (Cluster-based Routing Protocol) pour distribuer équitablement la consommation d'énergie entre les nœuds capteurs et prolonger la durée de vie du réseau. En effet, notre protocole a été conçu avec deux objectifs principaux : la maximisation de la durée de vie du réseau de capteurs sans fil et la scalabilité. Le protocole proposé utilise la rotation des cluster-heads et la communication multi-sauts entre les cluster-heads pour équilibrer la charge entre les nœuds du réseau, conserver l'énergie, permettre la scalabilité et couvrir une grande zone d'intérêt. Pour réduire la quantité d'informations qui doivent être envoyées à la station de base, nous avons intégré l'agrégation de données à ce protocole. Dans ce chapitre, nous présentons le protocole proposé et nous évaluons ses performances.

4.2 Protocole de routage hiérarchique

Plusieurs protocoles de routage ont été proposés pour les réseaux de capteurs sans fil, que ce soit des protocoles à plat ou hiérarchiques. Les protocoles de routage à plat s'appuient sur une vue à plat où tous les nœuds sont au même niveau et effectuent les mêmes

tâches. Par ailleurs, certaines applications nécessitent un nombre élevé de nœuds capteurs. Ceci implique un nombre élevé de messages circulant dans le réseau et conduit donc à l'épuisement des ressources énergétiques des nœuds capteurs. Les protocoles hiérarchiques utilisent une architecture hiérarchisée appelée aussi clustering. Grâce à la création de clusters qui agrègent et fusionnent les données, le réseau devient capable de supporter une charge supplémentaire. De plus, les techniques de mise en veille des nœuds capteurs ne participant pas au routage permettent de réduire considérablement la consommation d'énergie.

Dans les protocoles de routage à plat (multi-sauts), une grande zone d'intérêt peut être couverte alors que la consommation d'énergie n'est pas distribuée équitablement entre les nœuds capteurs. Les protocoles hiérarchiques qui utilisent l'envoi direct à la station de base sont beaucoup plus efficaces en termes d'équilibrage de charge mais souffrent quand la zone à couvrir devient grande. En effet, la majorité des protocoles hiérarchiques ne traitent que le routage à un seul saut des cluster-heads vers la station de base. Ces protocoles supposent que les cluster-heads peuvent communiquer directement avec la station de base. Cela devient difficile lorsque l'étendue du réseau augmente. De plus, les cluster-heads les plus éloignés de la station de base épuisent leurs ressources énergétiques plus rapidement que les cluster-heads les moins éloignés. Pour pallier ce problème, la solution la mieux adaptée est d'intégrer une technique de routage multi-sauts pour l'acheminement des données des cluster-heads vers la station de base.

Pour regrouper les nœuds capteurs en clusters, on peut utiliser soit une approche de clustering centralisée ou distribuée. L'utilisation d'une approche centralisée permet d'éviter le calcul au niveau des nœuds capteurs. Cependant, une mise à jour constante des informations concernant les nœuds capteurs au niveau de la station de base est nécessaire. Par exemple, la station de base peut garder les coordonnées des nœuds capteurs et leur niveau d'énergie. En se basant sur ces informations, la station de base exécute un algorithme génétique ou une autre technique pour sélectionner les cluster-heads et former les clusters. Cette méthode s'avère très coûteuse en termes de messages de contrôle. En effet, la mise à jour périodique des informations des nœuds capteurs au niveau de la station de base implique une surcharge du réseau et une consommation supplémentaire d'énergie. Les approches distribuées sont moins coûteuses en termes de messages de contrôle. Cependant, la plupart d'entre elles se basent sur des méthodes probabilistes où les cluster-heads sont sélectionnés aléatoirement, sans tenir compte des paramètres du réseau. Ceci n'assure pas une bonne répartition des clusters et entraîne l'épuisement rapide des batteries des cluster-heads.

En prenant en considération les points cités ci-dessus et en analysant les avantages et les inconvénients de différents protocoles de routage proposés dans la littérature pour les réseaux de capteurs sans fil, nous avons développé un protocole de routage basé sur le clustering (Cluster-based Routing Protocol). Adapté aux réseaux de capteurs sans fil, le protocole proposé vise à équilibrer et minimiser la consommation d'énergie. En fait, nous avons conçu ce protocole avec deux objectifs principaux : la maximisation de la durée de vie du réseau de capteurs sans fil et la scalabilité. Dans ce protocole, les nœuds capteurs sont organisés en couches (layers). Chaque nœud capteur exécute un algorithme de clustering distribué. La performance de notre protocole dépend principalement de l'algorithme de clustering. La localisation des cluster-heads et le nombre de nœuds dans chaque cluster sont deux facteurs importants dans la conception de notre protocole. Le changement du rôle de cluster-head permet de distribuer la charge énergétique de manière équitable entre les nœuds capteurs. Les principales caractéristiques de notre protocole sont :

- Conçu pour les applications périodiques (applications de surveillance appelées aussi applications orientées temps).
- Agrégation de données pour réduire les communications.
- Transmission multi-sauts vers la station de base.
- Rotation des cluster-heads et les clusters correspondants.

Dans notre protocole, on a essayé de profiter des clusters pour la transmission de données à la station de base, i.e. la plupart des nœuds capteurs communiquent sur de petites distances avec les cluster-heads. Seulement les cluster-heads doivent transmettre sur de longues distances pour atteindre la station de base. Notre protocole tourne le rôle de cluster-head entre les nœuds capteurs et forme des clusters adaptatifs, ce qui permet de distribuer la charge entre tous les nœuds du réseau. En plus, notre protocole effectue des calculs locaux dans chaque cluster pour réduire la quantité de données devant être transmises à la station de base. Ceci permet d'atteindre une grande réduction de la dissipation d'énergie, comme le calcul est moins coûteux que la communication.

4.3 Détails du protocole proposé

Le principe de fonctionnement de notre protocole est le suivant : premièrement, le réseau est organisé sous forme de couches en se basant sur la distance entre les nœuds capteurs et la station de base. Deuxièmement, chaque nœud capteur exécute un algorithme de clustering distribué. Les nœuds capteurs s'organisent en couches en fonction du nombre de sauts (hops) chacun prend pour atteindre la station de base. Chaque nœud capteur

exécute l'algorithme de clustering pour s'élire cluster-head (**CH**) ou être un nœud régulier. Tous les nœuds non-cluster-heads vont ensuite choisir le cluster à joindre. Chaque nœud cluster-head reçoit les données de tous les membres de son cluster et les transmet à la couche supérieure. L'agrégation de données se fait au niveau des cluster-heads. La rotation périodique des cluster-heads permet d'équilibrer la charge dans le réseau, ce qui permet à notre protocole d'atteindre une durée de vie maximale du réseau. De plus, la mise en veille des nœuds capteurs et la transmission sur de petites distances permettent de réduire considérablement la consommation d'énergie.

Le protocole proposé a été divisé en rounds. Chaque round se compose de trois phases principales : phase d'initialisation, phase de clustering et phase de transmission de données (Figure 4.1). Dans la phase d'initialisation, la distance en termes de sauts entre la station de base et chaque nœud capteur est trouvée. La phase de clustering commence par la sélection des cluster-heads et la formation des clusters. Pendant cette phase de regroupement, chaque nœud capteur soit s'auto-élite cluster-head ou rejoint un cluster. Pour réduire les interférences, chaque cluster-head génère un ordonnancement **TDMA** (**TDMA** schedule). Durant la phase de transmission, les données collectées par les membres d'un cluster sont envoyées au cluster-head selon l'ordonnancement **TDMA**. Le cluster-head fusionne les données et les envoie à la station de base en utilisant une architecture multi-sauts. Pour minimiser l'énergie dépensée pendant l'initialisation et le clustering, la phase de transmission de données est assez longue par rapport aux deux autres phases.

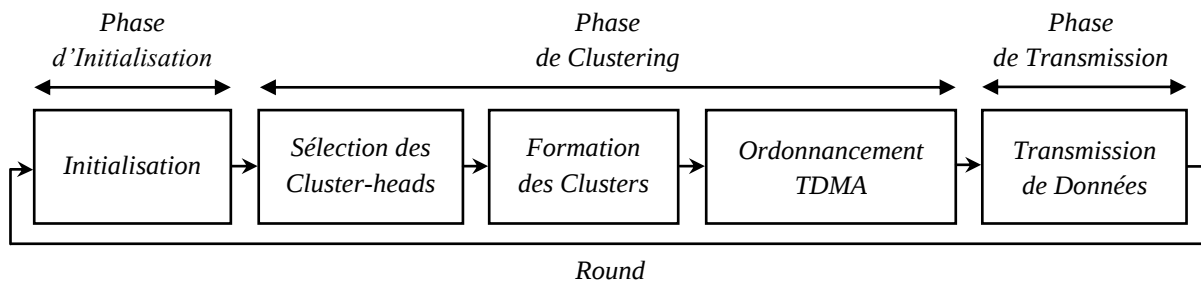


FIGURE 4.1 – Fonctionnement du protocole proposé

4.3.1 Phase d'initialisation

La phase d'initialisation consiste à attribuer à chaque nœud capteur un niveau (**level**) en fonction de sa distance avec la station de base (nombre de sauts) et un poids d'éligibilité à devenir cluster-head en fonction de son énergie restante. Cette phase est initiée par la station de base en envoyant un message **setup** avec un niveau nul. La distance entre les

noeuds capteurs et la station de base peut être trouvée en utilisant le message envoyé par la station de base (Figure 4.2). Initialement, seulement les noeuds capteurs qui sont à la portée de la station de base peuvent recevoir ce message (Figure 4.2 (a)). Ensuite, les noeuds capteurs du 1-saut (1-hop) explorent les noeuds capteurs du saut suivant (Figure 4.2 (b)). Les noeuds du 1-saut agissent comme stations de base locales pour les noeuds des sauts suivants. Le processus continue jusqu'à ce qu'il n'y aura pas de noeuds du saut suivant. Un noeud capteur peut recevoir plusieurs messages d'initialisation avec différents niveaux (*level*), dans ce cas le noeud sélectionne le message avec le plus petit niveau. Chaque noeud capteur maintient les informations de ses voisins, de cette façon, après la phase d'initialisation les chemins à la station de base peuvent être empruntés. En se basant sur la distance entre la station de base et les noeuds capteurs, le réseau de capteurs peut être divisé en couches. Chaque couche est constituée des noeuds capteurs ayant le même niveau. On utilise couche i pour représenter les noeuds capteurs ayant le niveau i . La Figure 4.2 (c) montre la structure du réseau après la phase d'initialisation.

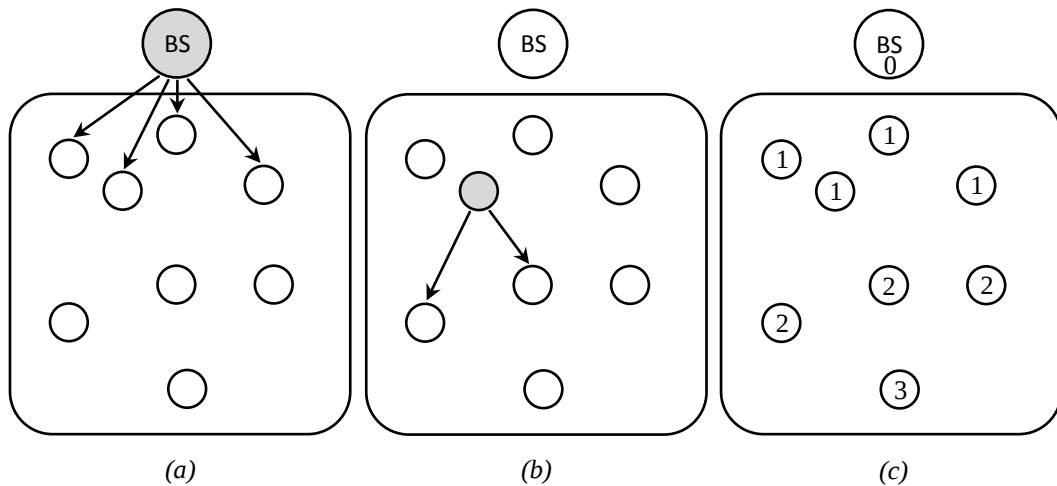


FIGURE 4.2 – Phase d'initialisation. Détermination des niveaux et échange d'informations. La station de base (BS) diffuse un message aux noeuds du 1-saut (a). Un noeud capteur du 1-saut diffuse un message à ses voisins (b). Structure en couches (c)

Chaque noeud capteur utilise le message d'initialisation (**setup**) pour diffuser à ses voisins son énergie restante en plus de son niveau (nombre de sauts). Tous les noeuds capteurs qui sont à la portée de ce noeud capteur reçoivent ce message. Tout en construisant la topologie du réseau et en attribuant les niveaux, chaque noeud capteur collecte l'énergie restante de l'ensemble de ses voisins peu importe le niveau du voisin. Après cette étape, chaque noeud capteur vote (ou autrement dit attribue une note) pour lui-même et pour ses voisins en se basant sur son énergie restante et celles de ses voisins. Pour un noeud

capteur S_i , le vote qu'il attribue à un nœud capteur voisin S_j est :

$$V(S_i, S_j) = \frac{E_j}{\sum_{S_k \in N_i} E_k} \quad (4.1)$$

Le vote attribué par un nœud capteur S_i à lui-même est :

$$V(S_i) = \frac{E_i}{\sum_{S_k \in N_i} E_k} \quad (4.2)$$

où

E_i : énergie restante du nœud capteur S_i .

N_i : ensemble des voisins du nœud capteur S_i .

Une fois les votes ont été déterminés, chaque nœud capteur diffuse les votes attribués à ses voisins. Ces derniers reçoivent ces votes et les votes attribués par d'autres nœuds capteurs voisins. Après réception des votes, chaque nœud capteur détermine son poids comme suit :

$$W(S_i) = V(S_i) + \sum_{S_k \in N_i} V(S_k, S_i) \quad (4.3)$$

Après le calcul des poids d'éligibilité, chaque nœud capteur diffuse son poids à l'ensemble de son voisinage. Pendant la phase de clustering, les nœuds capteurs vont se baser sur les poids pour s'élire cluster-heads ou rester nœuds capteurs réguliers. Dans la Figure 4.3, les nœuds capteurs A , B , C et D ont tous une énergie restante de $1J$ et la même portée de transmission. Les nœuds B , C et D sont à la portée de transmission de A . Mais B , C et D ne peuvent pas communiquer les uns avec les autres directement. Dans cette Figure, nous avons $V(A, B) = V(A, C) = V(A, D) = V(A) = 0.25$ et $V(B, A) = V(C, A) = V(D, A) = 0.5$. Ainsi $W(A) = 1.75$ et $W(B) = W(C) = W(D) = 0.75$.

L'avantage de cette technique de vote réside dans le fait que l'importance d'un nœud capteur doit être déterminée par le nœud lui-même et par tous ses voisins au lieu d'utiliser seulement les propriétés locales du nœud. Chaque nœud capteur calcule son adéquation et l'adéquation de ses voisins pour devenir cluster-head et attribue les votes. Les nœuds capteurs collectent les votes qui leur sont attribués par leurs voisins et calculent leur poids. Plus de votes un nœud capteur accumule plus il est important dans l'ensemble du réseau. Puisque les nœuds capteurs ignorent leur emplacement la topologie et l'énergie restante sont les deux principaux facteurs d'élection des cluster-heads. La prise en compte du facteur énergétique lors de la sélection des cluster-heads est d'une importance majeure. Comme les cluster-heads consomment plus d'énergie que les nœuds capteurs réguliers,

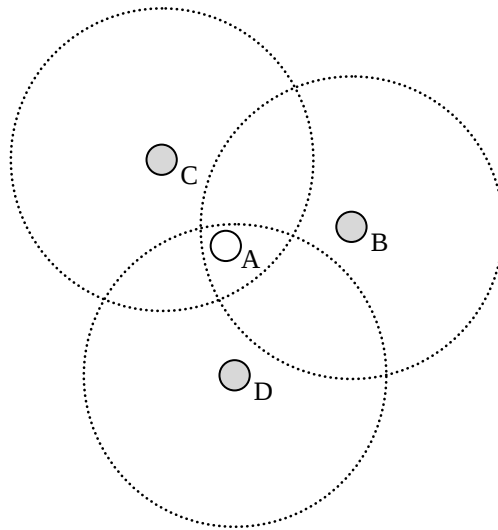


FIGURE 4.3 – Phase d’initialisation. Attribution de votes et calcul de poids (exemple de quatre nœuds capteurs)

ils devraient être sélectionnés à partir des nœuds ayant une énergie restante élevée. Semblable à d’autres algorithmes de clustering distribués, cet algorithme ne garantit pas une formation optimale de clusters. Cependant, il peut améliorer la formation de clusters en intégrant les informations des nœuds voisins.

4.3.2 Phase de clustering

La performance de notre protocole dépend principalement de l’algorithme de clustering. La position des cluster-heads, le nombre de cluster-heads et la taille des clusters sont des facteurs très importants à prendre en considération. Plusieurs algorithmes de clustering ont été proposés dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil [10] [27] [61]. Ces algorithmes de clustering peuvent être combinés avec une structure en couches comme nous avons fait dans notre protocole.

Dans la phase de clustering, les nœuds capteurs sont regroupés pour former des clusters. En fait, certains nœuds capteurs sont élus pour être cluster-heads. Ces cluster-heads forment des clusters en diffusant des messages d’annonce et en recevant des messages de rattachement. La phase de clustering est divisée en trois sous-phases : sous-phase de sélection de cluster-heads, sous-phase de formation de clusters et sous-phase d’ordonnancement.

4.3.2.1 Sélection des cluster-heads

Dans cette sous-phase de sélection, les cluster-heads sont choisis. Chaque nœud capteur décide ou non de devenir cluster-head pour le round courant. Chaque nœud capteur élu

cluster-head diffuse un message d'annonce pour le reste des nœuds. Les nœuds non-cluster-heads doivent garder leur radio en mode listen/receive durant cette phase afin d'entendre les messages d'annonce des cluster-heads. Pour cette sous-phase de sélection, les cluster-heads utilisent le protocole [MAC CSMA/CA](#) et transmettent leur annonce en utilisant la même puissance de transmission.

Les nœuds capteurs s'auto-élisent pour être cluster-heads en se basant sur les poids calculés et diffusés dans la phase d'initialisation. Chaque nœud capteur connaît les poids d'éligibilité de ses voisins. Pour s'élire cluster-head, un nœud capteur compare son poids avec ceux de ses voisins. Si son poids est le plus élevé alors il s'auto-élite cluster-head pour le round actuel. Dans l'exemple précédent (Figure 4.3), le nœud capteur *A* devient cluster-head comme il a le poids le plus élevé parmi tous ses voisins. Une fois les nœuds cluster-heads ont été choisis, chaque cluster-head diffuse un message d'annonce (**advertisement message**) pour les nœuds non-cluster-heads. Un nœud capteur peut être dans la portée de plusieurs cluster-heads. Ce nœud doit alors déterminer à quel cluster il veut appartenir. Le but principal de notre protocole est la maximisation de la durée de vie du réseau de capteurs sans fil. La décision prise par les nœuds capteurs doit équilibrer la charge des cluster-heads. Donc, le nœud capteur privilégiera de rejoindre le cluster dont le cluster-head est le moins chargé au regard de l'effectif géré. Par conséquent, après la sélection des cluster-heads et avant la diffusion des messages d'annonce chaque cluster-head calcule tout d'abord sa valeur de fitness et la diffuse avec le message d'annonce. La valeur de fitness est calculée de la manière suivante :

$$fitness(S_i) = \frac{1}{D(S_i)} \quad (4.4)$$

où

$D(S_i)$: degré du nœud capteur S_i (nombre de voisins). Un nœud capteur choisit, donc, de rejoindre le cluster dont l'effectif est le plus faible.

4.3.2.2 Formation des clusters

Dans cette sous-phase, les clusters sont créés. Après avoir choisi un cluster-head le nœud capteur doit informer ce cluster-head qu'il sera un membre de son cluster. Le nœud capteur transmet cette information au cluster-head en utilisant le protocole [MAC CSMA/CA](#). Durant cette phase, tous les nœuds cluster-heads doivent garder leur radio en mode listen/receive afin d'entendre les messages d'attachement des nœuds non-cluster-heads. Avant de commencer toute communication avec le cluster-head, le nœud capteur ajuste sa puissance de transmission selon le [RSSI](#) du message d'annonce et la puissance de

transmission utilisée par le cluster-head pour diffuser ce message. Cet ajustement permet de conserver l'énergie considérablement.

Les nœuds capteurs reçoivent les messages d'annonce des cluster-heads et choisissent un cluster-head en comparant les valeurs de fitness. Un nœud capteur choisit le cluster-head ayant une valeur de fitness maximale. Il est possible que certains nœuds reçoivent l'annonce des cluster-heads appartenant à différentes couches. Nous n'avons imposé aucune restriction empêchant les nœuds non-cluster-heads de rejoindre les cluster-heads des autres couches. Une fois le choix est fait, le nœud capteur envoie un message de rattachement (*join-request message*) au cluster-head choisi. Les nœuds cluster-heads peuvent aussi recevoir l'annonce des cluster-heads appartenant à d'autres couches. Dans un tel cas, le cluster-head sélectionne le cluster-head de la couche supérieure (avec un niveau inférieur) qui a une valeur de fitness maximale comme son père cluster-head. Les nœuds cluster-heads n'envoient pas de messages de rattachement aux autres cluster-heads. Après cette sous-phase, certains nœuds capteurs se sont élus cluster-heads et d'autres ont choisi de rejoindre un cluster-head.

4.3.2.3 Ordonnancement

Les cluster-heads attendent les messages de demande d'attachement des nœuds non-cluster-heads. Après avoir reçu ces messages, chaque cluster-head crée un ordonnancement TDMA (TDMA schedule) en se basant sur le nombre de nœuds dans le cluster. L'ordonnancement TDMA assigne à chaque membre du cluster un slot de temps pendant lequel il peut transmettre ses données. Cet ordonnancement permet aux nœuds non-cluster-heads de passer en mode veille (sleep mode) quand ils ne transmettent pas de données au cluster-head. Aussi, l'utilisation de l'approche TDMA dans les communications intra-cluster garantit l'absence de collisions de données dans le cluster. Une fois l'ordonnancement TDMA a été créé, le cluster-head le diffuse à tous ses membres de cluster.

Après la phase de clustering, le réseau sera constitué de plusieurs clusters avec un cluster-head dans chaque cluster. Dans cette structure, un nœud capteur appartient à un cluster en tant que nœud régulier (cluster-member ou non-cluster-head) ou cluster-head. Il est également possible que certains nœuds n'appartiennent à aucun cluster. Ces nœuds mettent leur radio en veille et attendent le prochain round afin de conserver l'énergie. La phase de clustering est suivie par la phase de transmission de données.

4.3.3 Phase de transmission de données

La phase de transmission de données se compose de trois activités principales : collecte, agrégation et envoi de données. Les cluster-heads reçoivent les données collectées par les nœuds capteurs et la station de base reçoit les données agrégées par les cluster-heads. La phase de transmission est divisée en tranches de temps (frames). Chaque frame est divisé en slots (Figure 4.4). Le nombre de slots dans un frame correspond au nombre de nœuds dans le cluster y compris le cluster-head. Chaque nœud non-cluster-head envoie ses données à son cluster-head une fois par frame pendant son slot de transmission alloué. Pendant les slots des autres membres du cluster la radio du nœud est éteinte (en mode sleep) afin de conserver l'énergie. En fait, la radio restera éteinte jusqu'au prochain slot. Les nœuds cluster-heads transmettent les données à la station de base en utilisant une architecture multi-sauts. Chaque cluster-head reçoit les données de ces membres et les envoie à son père cluster-head (parent). Si un cluster-head est sans père cluster-head, il diffuse le message de données. Tout autre cluster-head qui reçoit ce message l'envoie à son père cluster-head ou le rediffuse en cas d'absence de père. Lorsqu'un cluster-head reçoit les données des nœuds membres, au lieu de transmettre toutes les données, le cluster-head vérifie le contenu des données reçues puis les combine en éliminant les données redondantes. Ensuite, le cluster-head transmet les données agrégées à la station de base en utilisant le protocole [MAC CSMA/CA](#). L'agrégation des données minimise la charge du trafic en éliminant les redondances.

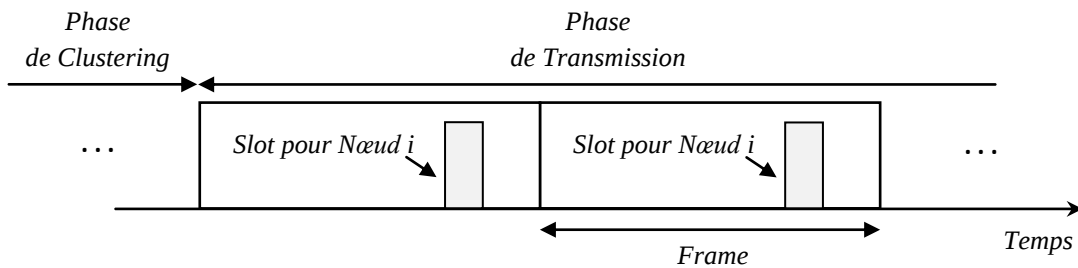


FIGURE 4.4 – Phase de transmission de données

Afin de distribuer la consommation d'énergie entre tous les nœuds du réseau de capteurs sans fil, notre protocole nécessite le re-clustering après une période de temps (round). Cela empêche le réseau d'assigner le rôle de cluster-head à quelques nœuds et épuiser leur énergie rapidement. Donc, après un certain temps déterminé à l'avance, le réseau recommence le processus à partir de la phase d'initialisation. La rotation de cluster-heads permet à notre protocole de distribuer la consommation d'énergie de manière équitable entre les nœuds capteurs. Cette rotation est très importante parce que les nœuds cluster-heads ont plus de responsabilités que les nœuds réguliers, par conséquent, ils

consomment plus d'énergie.

4.4 Pourquoi le simulateur OMNeT++/Castalia ?

Lors du développement de nouveaux algorithmes ou applications pour les réseaux de capteurs sans fil, il est très utile voire indispensable de faire des expérimentations avec un simulateur. Cela permet d'acquérir une meilleure compréhension du problème à la main ainsi que d'essayer différents scénarios. Il y a une variété de simulateurs que les chercheurs utilisent pour couvrir leurs besoins dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil [36]. Des simulateurs qui émulent un processeur répandu pour les nœuds capteurs pour tester le code écrit pour certaines plates-formes, des simulateurs écrits en C++ ou Matlab pour tester certaines propriétés d'un algorithme de premier ordre ou des simulateurs utilisés pour les réseaux informatiques traditionnels modifiés de quelque façon pour être utilisés pour les réseaux de capteurs sans fil. Alors pourquoi OMNeT++/Castalia ?

Dans le contexte de notre travail, nous voulons comparer différents protocoles de communication et évaluer les performances du protocole que nous avons proposé. Nous nous sommes intéressés à des environnements de simulation qui offrent la modularité, des modèles radio/canal réalistes et, en même temps, une programmation confortable afin que les résultats de simulation soient plus significatifs et nous guident dans notre recherche. Nous avons opté pour le simulateur OMNeT++/Castalia. Castalia est une plate-forme générique, avec des modèles radio/canal sans fil réalistes, permettant d'effectuer une validation de premier ordre d'un algorithme avant de passer à une implémentation sur une plateforme spécifique [1]. Castalia est basé sur le fameux environnement de simulation OMNeT++, qui fournit principalement la modularité de Castalia. Les modèles radio/canal réalistes, la modularité, la rapidité et la possibilité de programmer dans un langage orienté objet (C++) sont parmi les raisons qui nous ont conduit à préférer OMNeT++/Castalia, sur d'autres simulateurs de réseaux disponibles comme le bien connu ns-2, SensorSim et autres extensions liées aux réseaux de capteurs sans fil.

4.5 Présentation d'OMNeT++/Castalia

OMNeT++ [2] est un environnement de simulation à événements discrets connu pour sa modularité excellente et sa rapidité. OMNeT++ supporte plusieurs frameworks destinés à différents domaines de recherche. Par exemple, le framework MF (Mobility Framework) pour simuler les réseaux mobiles, le framework INET qui modélise plusieurs protocoles Internet, etc. OMNeT++ est écrit en C++, bien documenté et dispose d'une interface

graphique facilitant le développement et le débogage. De plus, une large communauté de contributeurs soutient OMNeT++ en fournissant des mises à jour et de nouveaux frameworks.

Castalia [1] est un simulateur pour les WSN (Wireless Sensor Networks), les BAN (Body Area Networks) et généralement les réseaux de dispositifs embarqués de faible puissance. Castalia est basé sur le simulateur OMNeT++ et peut être utilisé par les chercheurs qui veulent tester leurs algorithmes et/ou protocoles avec des modèles réalistes, en particulier la radio, le canal sans fil et le comportement des nœuds capteurs. Dans ce travail, nous utilisons la version 3.2 de Castalia et 4.1 d'OMNeT++. Dans cette version, Castalia fournit des modèles radio/canal avancées, des protocoles MAC avec un grand nombre de paramètres réglables et un modèle hautement flexible permettant de simuler des processus physiques. Castalia offre des modèles pour simuler le canal radio et la couche physique du module radio. En particulier, Castalia fournit un modèle pour le contrôleur radio CC2420, qui est la radio (l'émetteur-récepteur) des plateformes TelosB/TmoteSky¹. Les principales caractéristiques de Castalia sont :

- Modèle de canal avancé basé sur des données empiriques.
- Modèle de radio avancé basé sur de réelles radios.
- Modèle de détection (processus physiques).
- Protocoles MAC (S-MAC, T-MAC, CSMA/CA, IEEE 802.15.4 MAC, ...) et de routage disponibles (multi-path rings routing).
- Conçu pour l'adaptation et l'expansion.

Concernant le dernier point, Castalia a été conçu pour que les utilisateurs puissent facilement implémenter/importer leurs algorithmes et protocoles. La modularité, la fiabilité et la rapidité de Castalia sont partiellement héritées d'OMNeT++. Le but de Castalia est de fournir une framework générique, fiable et réaliste pour la validation d'algorithmes et protocoles avant de passer à l'implémentation sur une plate-forme spécifique. Castalia n'est pas utile si on souhaite évaluer les performances pour une plate-forme de nœuds capteurs spécifique. Pour un tel usage il y a d'autres simulateurs disponibles, par exemple Avrora.

1. Crossbow Technology Inc. <http://www.xbow.com/>

4.6 Structure d'un réseau de capteurs sans fil dans Castalia

Les concepts de base d'OMNeT++ sont les modules et les messages. Un module simple est l'unité de base d'exécution. Un module simple accepte des messages d'autres modules ou de lui-même, et en fonction du message, il exécute un morceau de code. Il y a aussi les modules composés. Un module composé est une construction de modules simples et/ou composés. La structure d'un réseau de capteurs sans fil dans Castalia est montrée dans la Figure 4.5. Les nœuds ne se connectent pas directement mais via le module canal sans fil. Un nœud capteur se connecte au canal sans fil pour communiquer avec d'autres nœuds capteurs. Les flèches représentent le passage de messages entre les modules (processus physiques, nœuds et canal sans fil). Quand un nœud a un paquet à envoyer, celui-ci passe par le canal sans fil qui décide quels nœuds devraient recevoir ce paquet. Les nœuds sont aussi liés via les processus physiques qu'ils surveillent. Chaque processus physique correspond à un dispositif de détection (capteur) disponible au niveau des nœuds. Pour collecter des données de l'environnement, le nœud envoie un message au processus physique correspondant. Les processus physiques et le canal sans fil sont représentés par des modules simples. Le nœud est un module composé. La Figure 4.6 montre la structure interne d'un nœud capteur dans Castalia. Les flèches en trait continu représentent le passage de messages et les flèches en pointillé signifient appel de fonctions. Par exemple, la plupart des modules (la radio, le gestionnaire de capteurs, ...) appellent une fonction du gestionnaire de ressources (resource manager) pour signaler que l'énergie a été consommée.

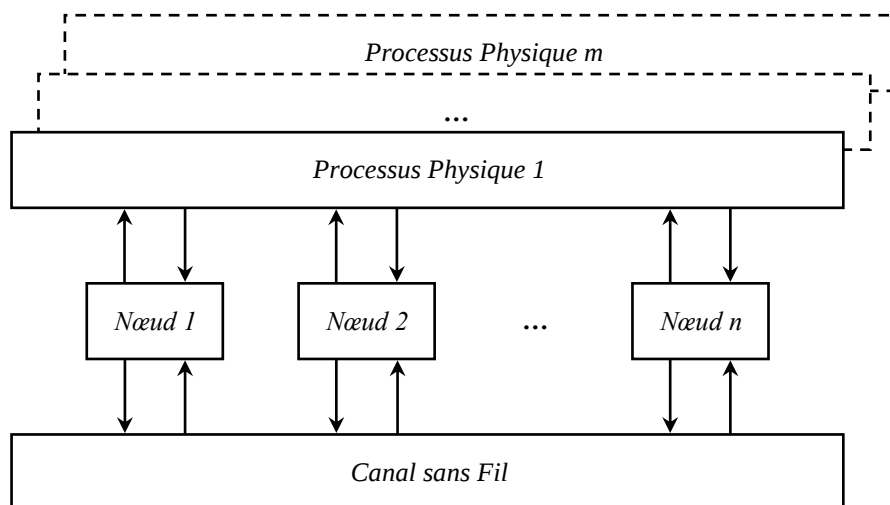


FIGURE 4.5 – Structure d'un réseau de capteurs sans fil dans Castalia

Cette structure de réseaux de capteurs sans fil représentée par les Figures 4.5 et 4.6, est implémentée dans Castalia en utilisant le langage [NED](#) d'[OMNeT++](#). Avec ce langage, on peut facilement définir des modules, i.e., définir le nom, les paramètres et les interfaces du module et la structure des sous-modules dans le cas d'un module composé. La structure de Castalia se reflète dans la hiérarchie des répertoires du code source. Chaque module correspond à un répertoire qui contient toujours un fichier ".ned" qui définit le module. Pour les modules composés, on trouve des sous-répertoires pour définir les sous-modules. Si le module est simple, le code C++ (fichiers ".cc" et ".h") définit le comportement du module.

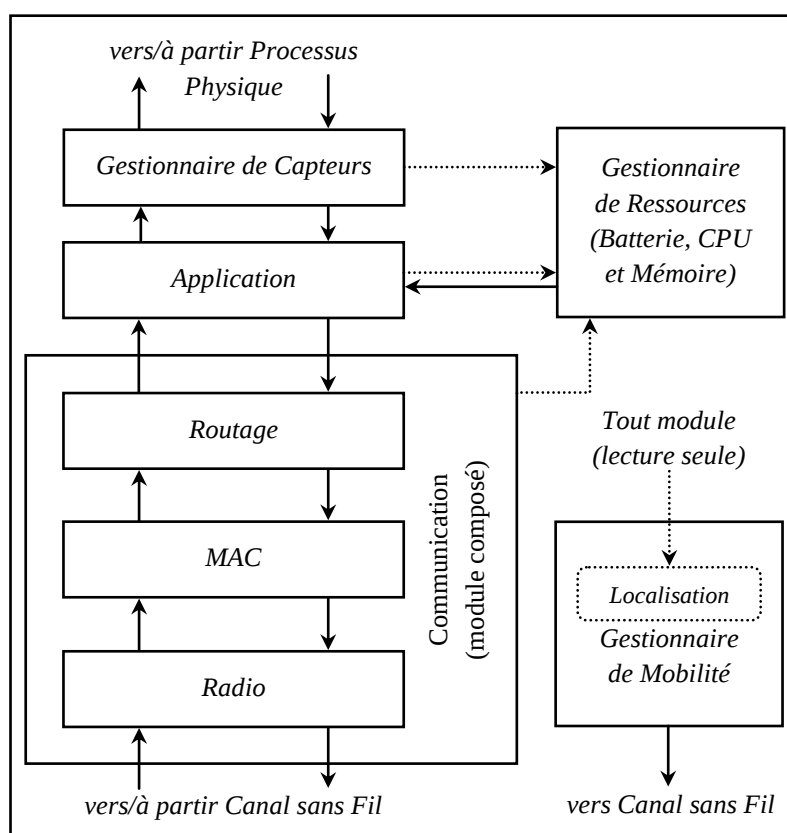


FIGURE 4.6 – Structure d'un nœud capteur dans Castalia

La communication est l'aspect le plus soigneusement modélisé dans le simulateur Castalia. Du canal sans fil à la radio et les différents protocoles [MAC](#), les développeurs de Castalia ont essayé de capter les détails de leurs homologues réels. Pour le module radio, les développeurs de Castalia ont essayé de capturer de nombreuses caractéristiques d'une véritable radio de faible puissance, comme celles utilisées dans les réseaux de capteurs sans fil. Les principales caractéristiques du module radio sont :

- Plusieurs états (modes) : transmit, receive/listen, sleep (plusieurs niveaux sleep,

configurable).

- Délais de transition entre les différents états.
- Plusieurs niveaux (puissances) de transmission (configurable).
- Consommation d'énergie différente pour les différents états et les différents niveaux de transmission utilisés.
- Plusieurs modes de fonctionnement (définis par : modulation, taux de données (data rate), bande passante (bandwidth) et autres paramètres), qui peuvent changer dynamiquement.
- Plusieurs schémas de modulation supportés (FSK, PSK, DiffQPSK, DiffBPSK, ...).
- Possibilité de définir des schémas de modulation personnalisés.
- Calcul permanent du RSSI (Received Signal Strength Indicator).
- Capacité CCA (Channel Clear Assessment).
- Calcul de l'interférence qui change dynamiquement lors de la réception d'un paquet et le calcul des erreurs dans un paquet.

Une radio peut avoir différents modes (ou niveaux) sleep. A chaque niveau correspond une consommation d'énergie différente. Les niveaux sleep vont du plus superficiel (i.e., celui qui consomme plus d'énergie) au plus profond. Une fois dans un niveau de sommeil, la radio ne peut aller ou passer qu'au niveau immédiatement en haut ou en bas. Il faut que la radio soit au niveau sleep le plus haut (le moins profond) pour entrer à l'état transmit ou receive. Lorsque la radio passe de l'état transmit ou receive à l'état sleep, elle entre tout d'abord au niveau superficiel et progressivement passe aux niveaux plus profonds. Castalia contient trois modèles radio : CC2420, CC1000 et BANRadio. La BANRadio représente la radio à bande étroite (narrowband radio) proposée dans les documents [IEEE 802.15](#) ([IEEE 802.15 Task Group 6 documents](#)). CC2420 et CC1000 définissent les radios réelles du même nom. Pour nos simulations, nous avons opté pour la radio CC2420. Cette radio est très répandue pour les réseaux de capteurs sans fil. Plusieurs plates-formes bien connues comme TelosB et MicaZ sont équipés de cette radio.

Le protocole [MAC](#) est une partie importante du comportement du nœud. Castalia définit plusieurs protocoles [MAC](#) : [CSMA/CA](#), [T-MAC](#), [S-MAC](#), [IEEE 802.15.4 MAC](#), etc. Le routage dans Castalia reçoit moins d'attention par rapport aux autres modules de communication. Castalia fournit un seul protocole de routage appelé multipathRings. Dans ce protocole, les nœuds n'ont pas un parent spécifique. Durant la phase set-up, chaque nœud dans le réseau obtient un numéro de niveau (level number) ou numéro d'anneau (ring number). La phase de set-up commence à la station de base. Cette dernière envoie le premier paquet de set-up avec niveau 0. Tout nœud qui reçoit le paquet de

set-up ajoute 1 au niveau et retransmet le paquet. Le processus continue avec chaque nœud ajoute 1 au niveau du paquet de set-up reçu. Tous les nœuds connectés auront un numéro de niveau. Il peut y avoir aussi des nœuds non connectés. Quand un nœud veut envoyer un paquet à la station de base, il ne l'envoie pas à un nœud particulier, mais plutôt il le diffuse en joignant son numéro le niveau. Tout nœud avec un numéro de niveau plus petit rediffuse le paquet. Le processus se poursuit jusqu'à atteindre la station de base. Avec cet algorithme, plusieurs chemins peuvent être pris pour atteindre la station de base. Cet algorithme peut être plus robuste comparé aux algorithmes qui utilisent un seul chemin à la station de base, mais si le trafic dépasse un certain seuil, la congestion tue les performances.

4.7 Modèles de consommation d'énergie par la radio

La radio possède quatre modes ou états de fonctionnement : émission (transmit), réception (receive), écoute (idle ou listen) et sommeil (sleep). Une radio dans le mode idle (listen) est prête à recevoir des trames, mais elle n'est pas en train de recevoir (en écoute). L'énergie d'émission est déterminée par la quantité des données à communiquer et la puissance de transmission utilisée, ainsi que par les propriétés physiques de la radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance. Quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Dans ce qui suit nous présentons deux modèles de consommation d'énergie pour la radio. Le premier est un modèle théorique très connu alors que le deuxième est le modèle utilisé par le simulateur Castalia.

4.7.1 Modèle de consommation théorique

Dans le papier du fameux protocole LEACH [26] [27], Heinzelman et al. ont proposé un modèle simple de consommation d'énergie pour la radio. À notre connaissance, ce modèle est le seul modèle utilisé dans la plupart des articles des protocoles de routage basés sur le clustering. Dans ce modèle, la radio consomme $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ pour mettre en marche le circuit d'émission/réception et $\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$ pour l'amplification (Figure 4.7 et Tableau 4.1). Ainsi, pour émettre un message de k -bit sur une distance d en utilisant ce modèle de consommation, la radio consomme :

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

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

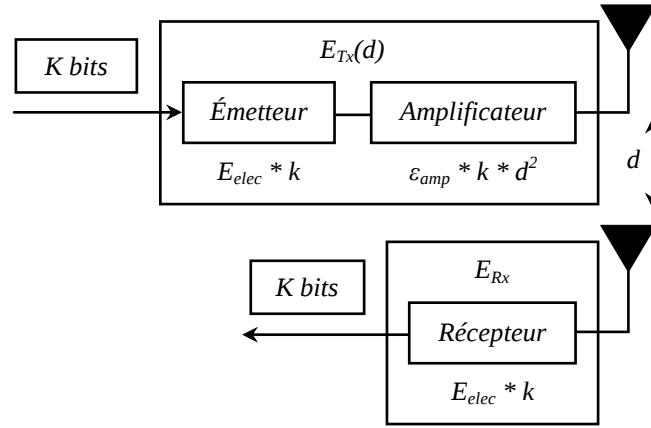


FIGURE 4.7 – Modèle théorique de consommation d'énergie par la radio

Opération	Énergie consommée
Transmission ($E_{Tx-elec}$)	50 nJ/bit
Réception ($E_{Rx-elec}$)	
($E_{Tx-elec} = E_{Rx-elec} = E_{elec}$)	
Amplification (ϵ_{amp})	100 pJ/bit/m ²

TABLE 4.1 – Caractéristiques de la radio

Pour recevoir ce message, la radio consomme :

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k$$

Avec

E_{elec} : énergie de transmission/réception électronique.

k : taille du message.

d : distance entre l'émetteur et le récepteur.

E_{Tx-amp} : énergie d'amplification.

ϵ_{amp} : facteur d'amplification.

Différentes hypothèses sur les caractéristiques de la radio, y compris la consommation d'énergie dans les différents modes transmit, receive/listen et sleep, changent les avantages de différents protocoles. Malgré les nombreux inconvénients de ce modèle, il est utilisé jusqu'à présent par de nombreux chercheurs [9] pour évaluer leurs travaux, particulièrement en les comparant à LEACH [27] ou LEACH-C [26]. Ce modèle n'est pas réaliste et a de nombreux inconvénients. Ce modèle ignore la consommation d'énergie en mode listen, que nous connaissons souvent comme un principal contributeur pour l'énergie consommée

dans les réseaux de capteurs sans fil. Aussi, ce modèle a de sérieux problèmes concernant la consommation d'énergie dans le mode transmit. L'utilisation de ce modèle affecte les résultats de l'évaluation des protocoles parce qu'il ajuste implicitement la puissance (niveau) de transmission en utilisant la distance pour consommer l'énergie. Le problème est que l'utilisation de la distance va consommer la quantité d'énergie exacte nécessaire pour cette communication, ce qui affecte les résultats de l'évaluation des protocoles. En réalité, on utilise les puissances de transmission disponibles. Chaque niveau consomme une quantité bien déterminée d'énergie. De plus, les auteurs de ce modèle utilisent un nouveau modèle [31] pour les nouveaux travaux. Par conséquent, il n'y a aucune excuse d'utiliser ce modèle maintenant même pour des raisons analytiques.

4.7.2 Modèle de consommation de Castalia

Dans cette section, nous présentons le modèle de consommation d'énergie de Castalia pour la radio CC2420. Cette radio consomme² $62mW$ dans l'état (mode) receive/listen. Dans l'état sleep, la radio consomme $1.4mW$ (un seul niveau sleep est défini). Pour l'état transmit, il existe huit niveaux de transmission (dBm) avec différente consommation d'énergie (mW) (Tableau 4.2). Dans le Tableau 4.2, la première ligne liste les différents niveaux de transmission (en dBm) et la deuxième ligne montre combien d'énergie la radio consommera lorsqu'elle transmet avec un niveau donné. Par exemple, si on transmet avec $0dBm$ la radio consomme $57.42mW$. En effet, ces nombres que le simulateur Castalia utilise pour la radio CC2420 sont extraits de la fiche technique (datasheet³) de cette radio. Dans ce modèle réaliste, l'énergie est consommée selon l'état de la radio. Par exemple, la radio consomme la même énergie en mode receive ou listen en d'autres termes si elle reçoit des paquets ou elle est juste en écoute.

Niveau de transmission (dBm)	0	-1	-3	-5	-7	-10	-15	-25
Énergie consommée (mW)	57.42	55.18	50.69	46.2	42.24	36.3	32.67	29.04

TABLE 4.2 – Énergie consommée dans le mode transmit par la radio CC2420

Mode	Énergie consommée (mW)
Receive/Listen	62
Sleep	1.4

TABLE 4.3 – Énergie consommée dans le mode receive/listen et sleep par la radio CC2420

2. $1 mW = 1 mJ/sec$

3. ChipCon 2420 Datasheet. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>

D'après le Tableau 4.2 et 4.3, on remarque que le mode receive/listen et le mode transmit consomment beaucoup d'énergie. Par conséquent, les protocoles de communication développés pour les réseaux de capteurs sans fil doivent minimiser non seulement les distances de transmission mais aussi les opérations de transmission et de réception, en mettant les nœuds capteurs en mode sleep le plus souvent possible. De plus, d'après le Tableau 4.2 et 4.3 on remarque bien qu'il vaut mieux transmettre que recevoir ou rester dans le mode listen (avec la puissance de transmission la plus grande la radio consomme $57,42mW$ et en mode receive/listen elle consomme $62mW$).

	RX	TX	SLEEP
RX	-	0.01	0.194
TX	0.01	-	0.194
SLEEP	0.05	0.05	-

TABLE 4.4 – Délais de transitions entre les états de la radio CC2420 (Transitions des états de colonnes vers les lignes en ms)

	RX	TX	SLEEP
RX	-	62	62
TX	62	-	62
SLEEP	1.4	1.4	-

TABLE 4.5 – Énergies de transitions entre les états de la radio CC2420 (Transitions des états de colonnes vers les lignes en mW)

Le Tableau 4.4 et 4.5 spécifient respectivement les délais (en $msec$) et l'énergie consommée (en mW) pendant les transitions entre les trois principaux états de la radio CC2420 : transmit (TX), receive/listen (RX) et sleep. Premièrement, pour les délais de transitions, il faut $194\mu sec$ pour changer de l'état sleep aux deux autres états transmit ou receive/listen, $10\mu sec$ pour changer entre les états transmit et receive/listen et $50\mu sec$ pour entrer à l'état sleep. Les non transitions sont représentées par des "-" au lieu d'un nombre. Deuxièmement, pour l'énergie consommée, les transitions à l'état sleep consomment $1.4mW$ alors que toute autre transition consomme $62mW$.

4.8 Ajustement de la puissance de transmission

Comment un nœud capteur peut déterminer la puissance de transmission appropriée ou en d'autres termes comment ajuster la puissance de transmission pour communiquer avec un autre nœud capteur et ce pour conserver l'énergie ? Nous allons présenter ici le problème

à travers un exemple. Prenons le clustering comme exemple. Dans la plupart des protocoles de clustering, chaque nœud capteur qui a été élu cluster-head diffuse un message d'annonce (advertisement message) aux autres nœuds du réseau. Les cluster-heads transmettent les annonces en utilisant une certaine puissance de transmission. Les nœuds non-cluster-heads écoutent aux messages d'annonce. Après cette phase d'écoute, chaque nœud non-cluster-head choisit un cluster-head en se basant sur différentes métriques comme par exemple le RSSI (received signal strength Indicator) des messages d'annonce. Le message d'annonce reçu avec le RSSI le plus grand est celui du cluster-head qui nécessite une puissance de transmission minimale (le cluster-head le plus proche). Un nœud capteur peut contrôler la puissance de transmission utilisée. En communiquant avec le cluster-head qui nécessite une puissance de transmission minimale, les nœuds capteurs minimisent la quantité d'énergie nécessaire à la transmission de données aux cluster-heads. Ainsi, un gain énergétique important peut être réalisé. Par exemple, supposons que les nœuds capteurs sont équipés d'une radio CC2420 et les cluster-heads transmettent les messages d'annonce avec une puissance de transmission de $0dBm$. Si un nœud a choisi le cluster-head avec un RSSI de $-75dBm$. Quelle est la puissance de transmission nécessaire pour communiquer avec ce cluster-head ?

Pour qu'un nœud capteur puisse ajuster sa puissance de transmission afin de communiquer avec un autre nœud, il doit recevoir un paquet de ce dernier. En d'autres termes, on utilise le RSSI du paquet reçu (calculé par la radio). Nous avons besoin d'autres informations comme la sensibilité de la radio de l'émetteur (en dBm) et la puissance de transmission utilisée pour transmettre le message. La sensibilité de la radio CC2420 est $-95dBm$ et la puissance de transmission utilisée est $0dBm$. Si un nœud capteur reçoit un paquet avec $RSSI = -75dBm$, le récepteur peut baisser la puissance de transmission de l'émetteur par $20dB$ ou moins et reste au-dessus de la sensibilité de la radio. De cette façon, un nœud capteur peut choisir la puissance de transmission appropriée. La formule utilisée pour calculer la puissance de transmission ajustée est :

$$TXpowerAdjusted > TXpowerTransmitter - (RSSI - Sensitivity)$$

où

$TXpowerAdjusted$: puissance de transmission ajustée.

$TXpowerTransmitter$: puissance de transmission de l'émetteur.

$Sensitivity$: sensibilité de la radio de l'émetteur (en dBm).

$RSSI$: RSSI du paquet reçu.

Cela est vrai, si les liens sont complètement symétriques. En cas d'asymétrie, par exemple, les deux directions d'un chemin entre deux nœuds capteurs varient de $4dBm$,

les variations possibles doivent être prises en compte dans la formule.

$$TXpowerAdjusted > TXpowerTransmitter + possibleVariation - (RSSI - sensitivity)$$

possibleVariation : variations possibles.

4.9 Simulation et analyses de performances

Dans cette section, nous analysons les performances de notre protocole, simulé avec OMNeT++/Castalia [1] [2], en le comparant à LEACH [26] [27]. LEACH est un protocole très connu dans le monde des réseaux de capteurs sans fil. Similaire à plusieurs protocoles proposés pour les réseaux de capteurs sans fil, les objectifs de LEACH sont la minimisation de la consommation d'énergie, l'équilibrage de charge et la maximisation de la durée de vie du réseau de capteurs. La comparaison de notre protocole avec LEACH est faite en termes des métriques suivantes :

1. Consommation d'énergie : cette métrique indique l'énergie consommée au cours du fonctionnement du réseau.
2. Durée de vie du réseau : cette métrique indique le nombre de nœuds capteurs qui meurent au cours de la période de fonctionnement du réseau.
3. Messages de données reçus : cette métrique indique le nombre de messages de données livrés avec succès à la station de base.

Nous testons aussi la résistance de la solution proposée au facteur d'échelle. Il existe d'autres critères afin d'évaluer un algorithme de clustering comme la minimisation du nombre de clusters et donc le nombre de cluster-heads, l'équilibrage de charge entre cluster-heads et donc la taille des clusters ou la surcharge de communication (nombre de messages de contrôle reçus par tous les nœuds capteurs). Pour cette dernière métrique, notre protocole utilise plus de messages que LEACH. Dans LEACH, les nœuds capteurs se basent sur leurs propriétés locales pour se regrouper en clusters. LEACH utilise trois types de messages de contrôle : messages d'annonce (advertisement packet), messages d'attachement (join-request packet) et messages d'ordonnancement (schedule packet). Les messages d'annonce et d'ordonnancement sont utilisés par les cluster-heads alors que les messages d'attachement sont utilisés par les nœuds capteurs afin de rejoindre le cluster-head choisi. Un cluster-head diffuse un message d'annonce aux nœuds non-cluster-heads, pour les informer de son élection. Dans notre protocole le message d'annonce contient la valeur de fitness du cluster-head. Nous utilisons en plus de ces trois messages trois autres messages à savoir : messages d'initialisation (topology setup packet), messages de

vote (vote packet) et messages de poids (weight packet). Le message d'initialisation est diffusé par chaque nœud capteur à tous ses voisins afin de construire les couches (attribuer un niveau ou numéro de sauts) et échanger les informations sur l'énergie restante. Le message de vote contient les votes attribués par le nœud capteur à ses voisins. Ce vote est calculé en fonction de l'énergie restante des nœuds voisins (y compris le nœud lui-même) et le degré du nœud (nombre de voisins). Le message de poids contient le poids du nœud calculé en fonction des votes reçus par ce nœud à partir de ces voisins.

4.9.1 Configuration de l'environnement de simulation

Un réseau de capteurs sans fil est composé de centaines ou de milliers de nœuds capteurs et une ou plusieurs stations de base. Les données collectées par les nœuds capteurs doivent être transmises à la station de base, où l'utilisateur final peut accéder aux données. Il existe plusieurs modèles possibles de réseaux de capteurs sans fil. Dans ce mémoire, nous considérons les réseaux de capteurs sans fil où :

- Les nœuds capteurs sont déployés aléatoirement dans la zone d'intérêt comme le montre la Figure 4.8.
- Une fois déployés, les nœuds capteurs sont laissés sans surveillance. Il est donc impossible de les recharger ou les changer en cas de déplétion d'énergie ou de panne. Par conséquent, la conservation de l'énergie est nécessaire (protocoles efficaces en énergie, ...).
- Tous les nœuds capteurs dans le réseau sont homogènes et à capacité égale (même énergie initiale, même capacité de stockage et de traitement de données).
- Les nœuds capteurs sont limités en énergie. Ce qui nécessite la maximisation de la durée de vie de chaque nœud capteur.
- Les nœuds capteurs ignorent leur emplacement géographique (absence de système de localisation tel que [GPS](#)).
- Les nœuds du réseau collectent et envoient leurs données vers une station de base unique.
- La station de base est située loin des nœuds capteurs.
- La station de base est caractérisée par une capacité illimitée (calcul, stockage et énergie).
- Tous les nœuds du réseau sont fixes y compris la station de base (configuration très fréquente pour les applications des réseaux de capteurs sans fil).
- Chaque nœud capteur a plusieurs niveaux ou puissances de transmission et contrôle la puissance de transmission. Un exemple de tels nœuds capteurs sont les "Berkeley Motes".

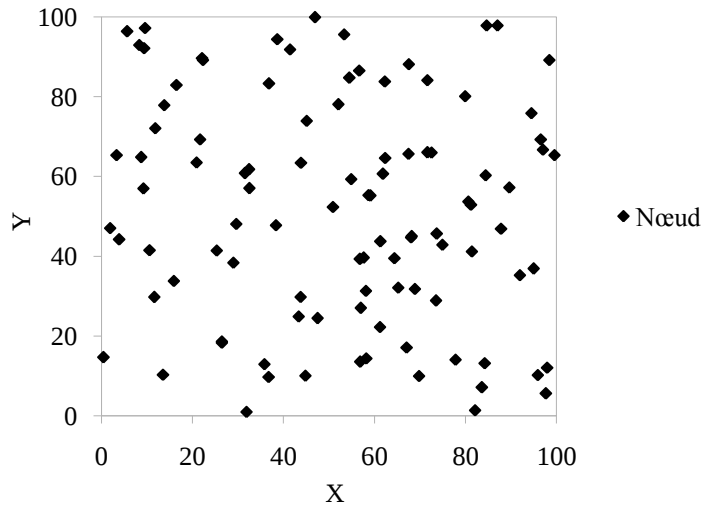


FIGURE 4.8 – 100 nœuds capteurs déployés aléatoirement dans une zone de 100×100 mètres

La communication entre les nœuds capteurs et la station de base est coûteuse, et il n'y a pas de nœuds à haute énergie à travers lesquels les nœuds capteurs limités en énergie peuvent communiquer avec la station de base. Les nœuds capteurs jouent deux différents rôles : nœud capteur et nœud cluster-head. Le nœud capteur surveille son environnement et transmet les données collectées vers son cluster-head. Le cluster-head est responsable de l'agrégation des données collectées par ses membres et de leur acheminement vers la station de base. Le cluster-head participe également au routage des données des autres clusters. Pour nos simulations, nous supposons que tous les nœuds capteurs collectent les données de l'environnement à un taux fixe (application orientée temps), ainsi les nœuds capteurs ont toujours des données à envoyer à la station de base. La radio utilisée est CC2420. La taille des paquets de données est fixée à 2000 *octets* et la taille des paquets de contrôle est 25 *octets*. Chaque nœud capteur a une énergie initiale de 100 *J*. Les simulations ont été exécutées dans une zone carrée de 100×100 mètres, avec 100 nœuds capteurs déployés aléatoirement (Figure 4.8). La station de base est située à la position 50, 150. Le Tableau 4.6 résume les paramètres utilisés dans nos simulations.

4.9.2 Résultats de simulation

Dans ce qui suit nous allons présenter et analyser les résultats de simulations obtenus suivant les métriques citées précédemment. Pour chaque simulation, nous avons réalisé plusieurs exécutions indépendantes et calculé la moyenne des résultats. Nous commençons par l'analyse de l'énergie consommée par les deux protocoles. A cause de la limitation des nœuds capteurs en termes de ressources énergétiques, il est indispensable de réduire

Paramètre	Valeur
Nombre de nœuds capteurs	100
Déploiement	aléatoire
Dimensions de la zone d'intérêt	100 × 100 mètres
Emplacement de la station de base	$x = 50, y = 150$
Énergie initiale des nœuds capteurs	100 J
Radio	CC2420
Débit	250 Kbps
Taille des paquets de données	2000 octets
Taille des paquets de contrôle	25 octets

TABLE 4.6 – Paramètres de simulation

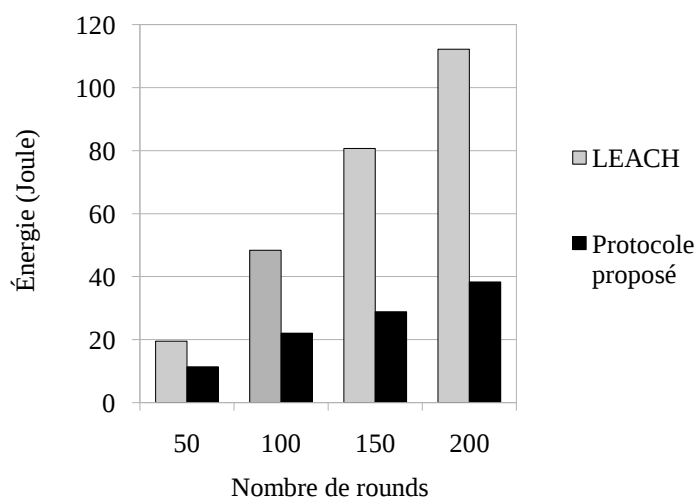


FIGURE 4.9 – Consommation d'énergie

la consommation d'énergie pour prolonger la durée de vie des nœuds capteurs et par conséquent celle du réseau. Les Figures 4.9 et 4.10 montrent que **LEACH** consomme plus d'énergie à cause de ses différents inconvénients. Dans **LEACH** par exemple les nœuds capteurs communiquent directement avec la station de base en utilisant la puissance de transmission la plus élevée. En effet, une puissance de transmission élevée nécessite une énergie importante. Par conséquent, les batteries des nœuds capteurs vont être épuisées rapidement. Par contre, la transmission sur de petites distances permet de réduire considérablement la consommation d'énergie. Pour cette raison, nous avons introduit le concept de multi-sauts dans notre protocole. Les nœuds communiquent sur de petites distances jusqu'à atteindre la station de base.

L'objectif primordial de notre approche est de prolonger la durée de vie du réseau. Cet objectif est réalisé à travers la transmission sur de petites distances, la bonne

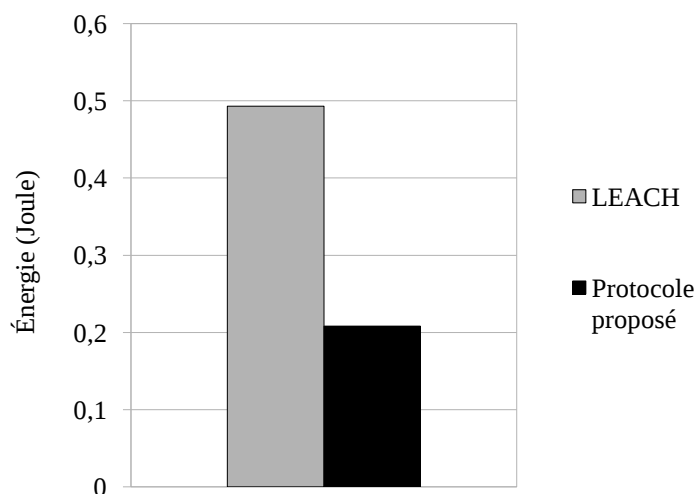


FIGURE 4.10 – Énergie moyenne consommée par round

distribution des cluster-heads et l'équilibrage de charge entre les clusters. Les nœuds capteurs communiquent seulement avec leurs voisins proches pour économiser l'énergie. Les cluster-heads sont sélectionnés en se basant sur les paramètres locaux et les paramètres des voisins afin d'avoir une vue assez globale et assurer une bonne répartition des cluster-heads. Chaque cluster a le même nombre de nœuds. Pour analyser la durée de vie du réseau nous avons choisi les trois définitions suivantes : la durée jusqu'à ce que le premier nœud capteur meurt (First Node Dies), la durée jusqu'à ce que la moitié des nœuds capteurs meurent (Half of the Nodes Die) et la durée jusqu'à ce que le dernier nœud meurt (Last Node dies). Comme plus d'un nœud capteur est nécessaire pour effectuer le clustering. Cette dernière définition représente la durée de vie du réseau de capteurs où 80% des nœuds capteurs meurent.

La Figure 4.11 montre que le premier nœud meurt plus tôt dans **LEACH** parce que les cluster-heads dans **LEACH** envoient les données agrégées directement à la station de base. De plus, **LEACH** ne garantit pas une bonne distribution des cluster-heads. **LEACH** utilise une méthode probabiliste où les cluster-heads sont sélectionnés aléatoirement sans tenir compte des paramètres du réseau. Dans un tel cas, certains nœuds capteurs consomment plus d'énergie parce que les cluster-heads ne sont pas au centre des clusters. Les Figures 4.12 et 4.13 montrent que les nœuds capteurs restent en vie pour plus de temps avec le protocole proposé.

La scalabilité d'un protocole de routage est l'une des caractéristiques les plus importantes pour un réseau de capteurs de grande taille. Pour cela, nous évaluons le

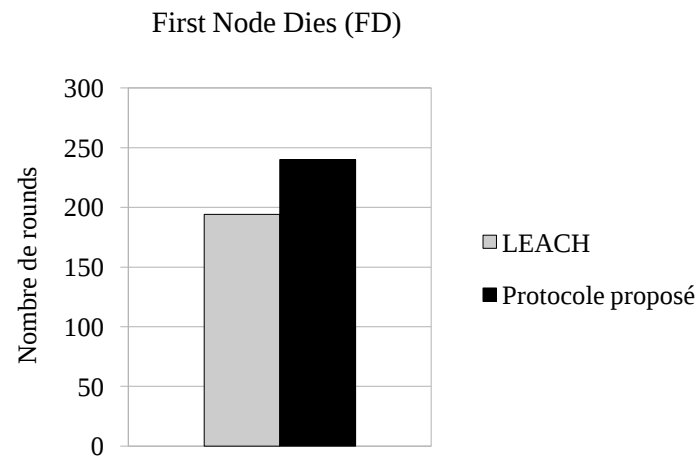


FIGURE 4.11 – Durée de vie du réseau lorsque le premier nœud capteur meurt

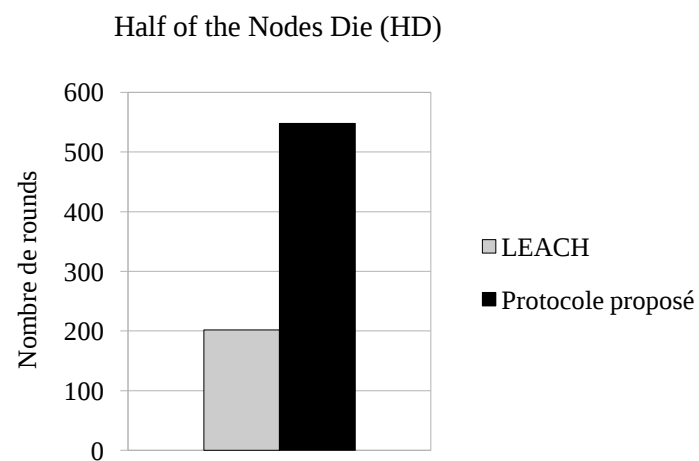


FIGURE 4.12 – Durée de vie du réseau lorsque 50% des nœuds capteurs meurent

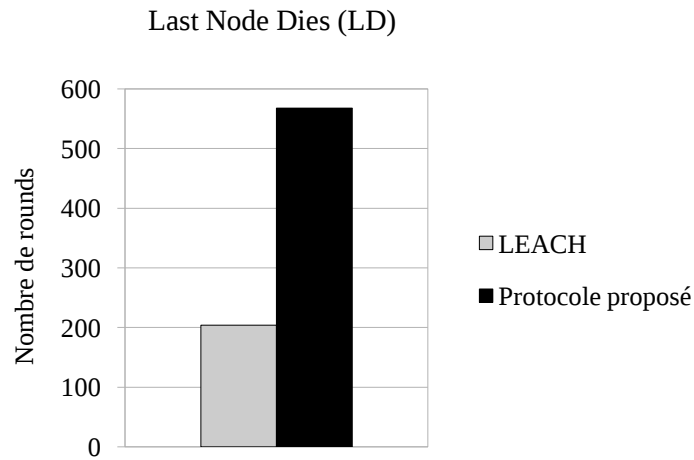


FIGURE 4.13 – Durée de vie du réseau lorsque 80% des nœuds capteurs meurent

comportement du protocole proposé lors de la variation de la taille du réseau de capteurs. Dans nos simulations, nous avons fait varier la taille du réseau de 100 à 250 nœuds capteurs. La Figure 4.14 montre le nombre de rounds jusqu'à ce que le premier nœud capteur meurt i.e. épuise son énergie en fonction du nombre de nœuds. Comme le montre la Figure 4.14, la méthode de rattachement de nœuds aux cluster-heads utilisé par notre protocole fonctionne mieux que celle utilisée par [LEACH](#), en particulier lorsque le réseau devient plus dense.

L'utilisation de la valeur de fitness des cluster-heads essaie d'équilibrer la taille des clusters. Un nœud capteur non-rattaché cherche à se rattacher au cluster-head le moins chargé. Sachant que l'énergie consommée par un cluster-head dépend essentiellement du nombre de nœuds capteurs membres, il est très important d'équilibrer la taille des clusters. Dans [LEACH](#), un nœud capteur écoute aux messages d'annonce des cluster-heads et choisit le cluster-head avec le signal le plus fort (le [RSSI](#) le plus grand) comme son cluster-head. En cas d'égalité, un cluster-head aléatoire est choisi. En utilisant cette technique avec le choix aléatoire de cluster-heads, un cluster-head avec une faible énergie résiduelle peut avoir un grand nombre de nœuds membres. Ce qui réduit la durée de vie des nœuds capteurs. Quand le réseau devient dense, cette situation est plus susceptible de se produire. D'après la Figure 4.14, notre protocole peut générer une durée de vie supérieure par rapport à [LEACH](#) et ce dans toutes les configurations. Notre protocole surpasse [LEACH](#) quand la densité des nœuds capteurs augmente. Lorsque le réseau devient dense, chaque nœud capteur reçoit plus de message de ces voisins durant la phase d'initialisation et de clustering. L'envoi et la réception de ces messages consomme de l'énergie. Toutefois, notre

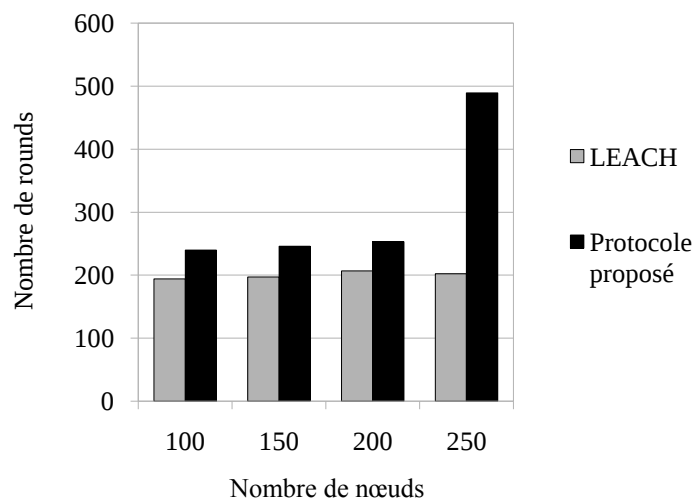


FIGURE 4.14 – Durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds lorsque le premier nœud meurt

protocole n'est pas trop affecté par la densité du réseau.

La Figure 4.15 montre les nœuds vivants au cours du temps. Dans notre protocole, les nœuds ayant une énergie résiduelle plus haute sont toujours choisis pour être cluster-head. Comme les nœuds capteurs se regroupent de nouveau après chaque round (périodiquement) et comme les cluster-heads consomment plus d'énergie, ces cluster-heads seront remplacés avec d'autres nœuds capteurs ayant plus d'énergie. [LEACH](#) ne prend pas en considération l'énergie résiduelle des nœuds capteurs pour le choix des cluster-heads. En effet, le choix des cluster-heads dans [LEACH](#) se fait aléatoirement et tous les nœuds capteurs dans le réseau jouent ce rôle périodiquement.

La Figure 4.16 montre le nombre de messages de données reçues par la station de base pendant le temps de fonctionnement du réseau. Dans les deux protocoles, chaque message est transmis sur un seul saut, des nœuds capteurs au cluster-head, où l'agrégation de données est faite. Les données agrégées sont envoyées à la station de base, ce qui réduit considérablement la quantité de données transmises. Dans [LEACH](#), les données agrégées sont envoyées directement à la station de base alors que dans le protocole que nous avons proposé, elles sont envoyées de cluster-heads en cluster-heads jusqu'à la station de base pour conserver l'énergie. Comme le taux des nœuds capteurs morts dans le protocole proposé est inférieur, plus de messages de données seront envoyées à la station de base par rapport à [LEACH](#).

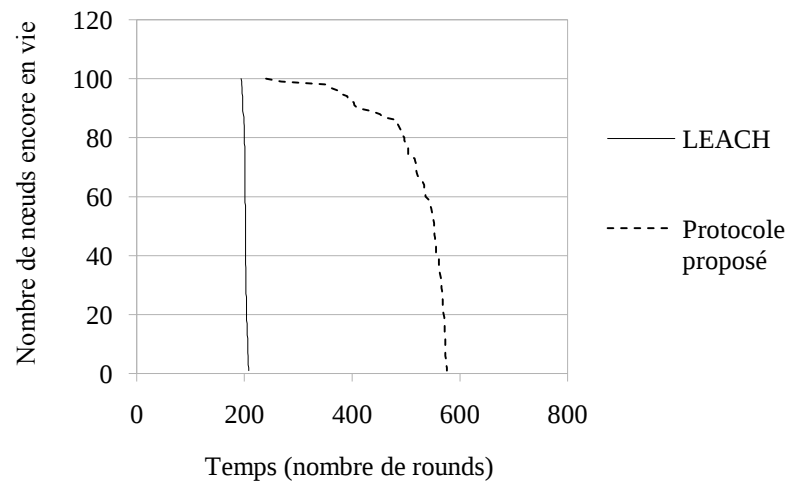


FIGURE 4.15 – Nombre de nœuds capteurs vivants pour un réseau de 100 nœuds

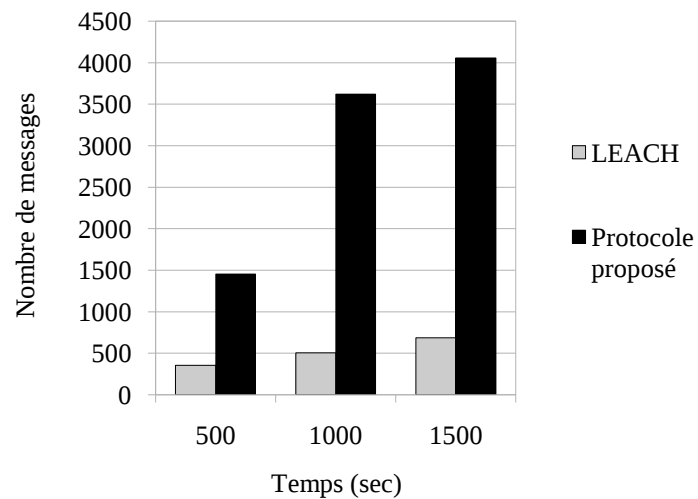


FIGURE 4.16 – Nombre de messages de données reçus par la station de base

Les simulations ont montré que le protocole proposé est meilleur que [LEACH](#) en termes de maximisation de la durée de vie du réseau pour les trois métriques : la durée jusqu'à ce que le premier nœud capteur meurt (First Node Dies), la durée jusqu'à ce que la moitié des nœuds capteurs meurent (Half of the Nodes Die) et la durée jusqu'à ce que le dernier nœud capteur meurt (Last Node dies). Dans notre protocole, plus de messages de données sont envoyées à la station de base parce que le taux des nœuds capteurs morts dans notre protocole est inférieur à celui de [LEACH](#). Le protocole proposé est meilleur en termes de durée de vie, livraison des données à la station de base et scalabilité.

4.10 Conclusion

D'après notre étude, nous avons constaté que les protocoles classiques de transmission directe à la station de base, de transmission multi-sauts et ceux basés sur un algorithme de clustering statique ne sont pas optimaux pour les réseaux de capteurs sans fil. Ces protocoles ont un impact important sur la dissipation d'énergie et l'équilibrage de charge pour ce type de réseaux. Lorsque les nœuds capteurs utilisent la communication à un seul saut pour atteindre la station de base, les nœuds capteurs situés plus loin de la station de base auront une charge énergétique plus élevée due aux communications à longue distance. Lorsque les nœuds capteurs utilisent la communication multi-sauts pour atteindre la station de base, les nœuds capteurs près de la base station auront une charge énergétique plus élevée parce qu'ils relayent les paquets des autres nœuds. Il faut donc trouver un mode de communication beaucoup plus adapté aux réseaux de capteurs sans fil.

Dans ce chapitre, nous avons proposé un protocole de communication pour les réseaux de capteurs sans fil pour distribuer équitablement la consommation d'énergie entre les nœuds capteurs et prolonger la durée de vie du réseau. Ce protocole est divisé en trois phases : phase d'initialisation, phase de clustering et phase de transmission de données. Tout au long de ce chapitre nous avons expliqué le fonctionnement du protocole proposé. Afin d'évaluer les performances de notre protocole, nous l'avons simulé en utilisant le simulateur [OMNeT++/Castalia](#). Les simulations ont montré que le protocole proposé est effectif en termes de consommation d'énergie. Les simulations ont montré également que notre protocole équilibre bien la consommation d'énergie entre les nœuds capteurs du réseau. La charge énergétique et les nœuds capteurs morts sont distribués équitablement dans le réseau. Ce qui permet d'assurer une grande longévité. Pour la scalabilité, les simulations ont montré que le protocole proposé est efficace dans les réseaux de capteurs sans fil densément déployés.

Conclusion et perspectives

Les réseaux de capteurs sans fil, en plein essor, soulèvent de nombreux problèmes, concernant le routage, la sécurité, etc. Malgré le nombre imposant de travaux déjà réalisés touchant à plusieurs de ces problématiques inhérentes aux réseaux de capteurs, les défis faisant face à de tels réseaux sont encore loin d'être résolus. Dans ce mémoire nous avons traité le problème de routage et d'équilibrage de charge. Cet aspect est fondamental pour ce genre de réseau limité en ressources et caractérisé par l'absence d'infrastructure. Un protocole de routage doit se réaliser en collaboration entre les différents nœuds du réseau tout en prenant en compte la limitation des ressources des nœuds : énergie limitée, capacité de traitement et de stockage modeste, bande passante faible, etc. L'objectif de notre travail était de proposer un protocole de routage qui équilibre la consommation d'énergie entre les nœuds capteurs et assure la plus grande longévité possible du réseau. Lorsque la taille du réseau devient de plus en plus importante, les protocoles de routage à plat ne résistent pas et se comportent de façon non optimale. D'où vient l'idée de partitionner le réseau en clusters. Le regroupement des nœuds capteurs autour de nœuds cluster-heads communiquant avec la station de base donne de meilleurs résultats, il réduit la consommation d'énergie, maximise la durée de vie et améliore la scalabilité du réseau. Cependant, comme les protocoles à plat, les protocoles de clustering centralisés ne s'adaptent pas bien au passage à l'échelle. Les protocoles distribués sont souvent préférés quand il s'agit de réseaux de grande taille. Pour atteindre tous ces objectifs, nous avons proposé un algorithme de clustering distribué. Cet algorithme construit la topologie structurée en clusters en trois phases : sélection des cluster-heads, formation des clusters et ordonnancement. La plupart des protocoles hiérarchiques supposent que tous les nœuds capteurs peuvent communiquer directement les uns avec les autres, et avec la station de base. Après la collecte des données des membres du cluster, le cluster-head achemine les données agrégées directement vers la station de base. Cette supposition, souvent considérée dans la littérature, n'est pas toujours valide en pratique. La portée de transmission limitée des nœuds capteurs et l'éloignement de la station de base rendent la communication directe impossible. Ce qui limite l'étendue du réseau et pose un problème pour l'adéquation de ces algorithmes pour les grands réseaux. Pour remédier à cette lacune, notre protocole utilise la communication

multi-sauts. Afin d'évaluer les performances du protocole proposé, nous avons réalisé des simulations. Nous avons utilisé le simulateur open source [OMNeT++](#)/Castalia. Castalia est codé en C++ et utilise le langage [NED](#) pour écrire les scénarios de simulations. Le protocole a été évalué selon trois métriques : la consommation d'énergie, la durée de vie du réseau qui indique le nombre de nœuds capteurs qui meurent au cours de fonctionnement et le nombre de messages de données reçus avec succès par la station de base. De plus, la résistance de notre solution au facteur d'échelle a été testée. Les simulations ont montré que le protocole proposé est effectif en termes de consommation d'énergie. Ces simulations ont également montré le bon comportement du protocole dans les réseaux à grande échelle.

Afin de continuer le travail, nous proposons de développer notre approche pour traiter le problème de la mobilité de la station de base sur un chemin non prédéfini. En effet, dans notre approche, les nœuds capteurs collaborent pour envoyer les données collectées à la station de base qui a une position connue. En revanche, lorsque la station de base est mobile, les nœuds capteurs ne pourront plus connaître sa position. La première solution qui vient à l'esprit est la diffusion des paquets de données dans tout le réseau. De cette manière, la station de base sera forcément atteinte. Mais, cette solution n'est pas efficace car le réseau sera inondé, ce qui consomme l'énergie des nœuds et par suite diminue la vie du système.

Bibliographie

- [1] Castalia : Simulator for Wireless Sensor Networks. <http://castalia.npc.nicta.com.au/>.
- [2] OMNeT++ : Simulation Environment. <http://www.omnetpp.org/>.
- [3] A. A. Abbasi and M. Younis. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer Communications*, 30 :2826–2841, 2007.
- [4] K. Akkaya and M. Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 3(3) :325–349, 2005.
- [5] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8) :102–144, August 2002.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer Networks*, 38 :393–422, 2002.
- [7] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : A Survey. *IEEE Wireless Communications*, 11 :6–28, 2004.
- [8] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella. Energy Conservation in Wireless Sensor Networks : a Survey. *Ad Hoc Networks*, 7(3) :537–568, May 2009.
- [9] F. Bajaber and I. Awan. Adaptive decentralized re-clustering protocol for wireless sensor networks. *Journal of Computer and System Sciences*, 77(2) :282–292, March 2011.
- [10] S. Bandyopadhyay and E. J. Coyle. An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2003)*, San Francisco, CA, 2003.
- [11] F. Bouabdallah, N. Bouabdallah, and R. Boutaba. Load-Balanced Routing Scheme for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6, November 30 - December 4, 2008.
- [12] F. Bouabdallah, N. Bouabdallah, and R. Boutaba. On Balancing Energy Consumption in Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(6) :2909–2924, July 2009.
- [13] A. Cerpa and D. Estrin. ASCENT : Adaptive Self-Configuring sEnsor Networks Topologies. *IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC)*, 3(3) :272–285, September 2004.
- [14] C.-Y. Chong and S. P. Kumar. Sensor Networks : Evolution, Opportunities, and Challenges. In *Proceedings of the IEEE*, volume 91, pages 1247–1256, August 2003.

- [15] D. Culler, D. Estrin, and M. Srivastava. Overview of Sensor Networks. *IEEE Computer*, 37(8) :41–49, August 2004.
- [16] T. V. Dam and K. Langendoen. An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *SenSys03*, pages 171–180, Los Angeles, CA, November 2003.
- [17] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagöz. MAC protocols for wireless sensor networks : a survey. *IEEE Communications*, 44(4) :115–121, April 2006.
- [18] J. Deng, Y. Han, W. Heinzelman, and P. Varshney. Balanced-energy Sleep Scheduling in High Density Cluster-based Sensor Networks. *Elsevier’s Computer Communications Journal*, 28 :1631–1642, 2005.
- [19] J. Deng, Y. S. Han, W. B. Heinzelman, and P. K. Varshney. Scheduling Sleeping Nodes in High Density Cluster-based Sensor Networks. *ACM/Kluwer MONET Special Issue on Energy Constraints and Lifetime Performance in Wireless Sensor Networks*, 10(6) :825–835, December 2005.
- [20] P. Ding, J. Holliday, and A. Celik. Distributed Energy-Efficient Hierarchical Clustering for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, Marina Del Rey, CA, June 30-July 1, 2005.
- [21] N. Freris, H. Kowshik, and P. R. Kumar. Fundamentals of Large Sensor Networks : Connectivity, Capacity, Clocks and Computation. In *Proceedings of the IEEE*, volume 98, pages 1828–1846, November 2010.
- [22] A. Giridhar and P. R. Kumar. Maximizing the Functional Lifetime of Sensor Networks. In *Proceedings of The Fourth International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN ’05*, pages 5–12, UCLA, Los Angeles, April 2005.
- [23] G. Gupta and M. Younis. Performance Evaluation of Load-Balanced Clustering of Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of IEEE International conference on communications (ICC)*, pages 1577–1581, 2003.
- [24] M. Haenggi. Energy-Balancing Strategies for Wireless Sensor Networks. In *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS’03)*, Bangkok, Thailand, May 2003.
- [25] W. Heinzelman. *Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, June 2000.
- [26] W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4) :660–670, October 2002.
- [27] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000.
- [28] W. R. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the fifth annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (MobiCom ’99)*, pages 174–185, Seattle, WA USA, August 1999.

-
- [29] K. Hellman and M. Colagrosso. Investigating a wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies. *Journal of Interconnection Networks*, 7(1) :91–99, 2006.
 - [30] K. Holger and A. Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley and Sons, 2005.
 - [31] M. Holland, T. Wang, B. Tavli, A. Seyed, and W. Heinzelman. Optimizing Physical Layer Parameters for Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 7(4), Nov. 2011.
 - [32] Y.-M. Huang, B.-L. Su., and M.-S. Wang. Localized and load-balanced clustering for energy saving in wireless sensor networks. *International Journal of Communication Systems*, 21(8) :799–814, August 2008.
 - [33] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed Diffusion : A scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In *Proceedings of the sixth annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 56–67, Boston, MA USA, 2000.
 - [34] M. Iqbal, I. Gondal, and L. Dooley. An Energy-Aware Dynamic Clustering Algorithm for Load Balancing in Wireless Sensor Networks. *Journal of Communications*, 1(3) :10–20, June 2006.
 - [35] N. Israr and I. Awan. Multihop clustering algorithm for load balancing in wireless sensor networks. *Internat. J. Simul. Systems Sci. Technol.*, 8(1) :13–25, 2007.
 - [36] M. Jevtic, N. Zogovic, and G. Dimic. Evaluation of Wireless Sensor Network Simulators. *Proceedings of the 17th Telecommunications Forum TELFOR 2009*, pages 1303–1306, November 2009.
 - [37] A. Kansal, A. Ramamoorthy, M. B. Srivastava, and G. J. Pottie. On Sensor Network Lifetime and Data Distortion. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory*, pages 6–10, Adelaide, Australia, September 2005.
 - [38] N. Kim, J. Heo, H. S. Kim, and W. H. Kwon. Reconfiguration of Clusterheads for Load Balancing in Wireless Sensor Network. *Computer Communications*, 31(1) :153–159, January 2008.
 - [39] S. Lindsey and C. S. Raghavendra. PEGASIS : Power-Efficient GAttering in Sensor Information Systems. In *IEEE Aerospace Conference*, volume 3, pages 1125–1130, 2002.
 - [40] C. P. Low, C. Fang, and Y. H. Ang J. M. Ng. Efficient Load-Balanced Clustering Algorithms for Wireless Sensor Networks. *Computer Communications*, 31 :750–759, March 2008.
 - [41] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, and J. Anderson. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 88–97, 2002.
 - [42] D. Mandala, X. Du, F. Dai, and C. You. Load balance and energy efficient data gathering in wireless sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, pages 645–659, 2008.
 - [43] A. Manjeshwar and D.P. Agarwal. TEEN : A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. *Parallel and Distributed Processing Symposium, International*, 3, 2001.

-
- [44] V. Mhatre and C. Rosenberg. Design Guidelines for Wireless Sensor Networks : Communication, Clustering and Aggregation. *Ad Hoc Networks Journal, Elsevier Science*, 2 :45–63, January 2004.
 - [45] V. Mhatre and C. Rosenberg. Homogeneous vs. Heterogeneous Clustered Sensor Networks : A Comparative Study. In *Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Communications (ICC 2004)*, pages 3646–3651, Paris, France, June 2004.
 - [46] V. P. Mhatre, C. Rosenberg, D. Kofman, R. Mazumdar, and N. Shroff. A Minimum Cost Heterogeneous Sensor Network with a Lifetime Constraint. *IEEE Transaction on Mobile Computing*, 4(1) :4–15, January-February 2005.
 - [47] M. Perillo, Z. Cheng, and W. Heinzelman. On the Problem of Unbalanced Load Distribution in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE GLOBECOM Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, November 2004.
 - [48] G. J. Pottie and W. J. Kaiser. Wireless Integrated Network Sensors. *Communications of the ACM*, 43(5) :51–58, May 2000.
 - [49] D. Puccinelli and M. Haenggi. Arbutus : Network-Layer Load Balancing for Wireless Sensor Networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'08)*, Las Vegas, NV, March 2008.
 - [50] D. Puccinelli and M. Haenggi. Lifetime Benefits through Load Balancing in Homogeneous Sensor Networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'09)*, Budapest, Hungary, April 2009.
 - [51] D. Puccinelli, E. Sifakis, and M. Haenggi. A Cross-Layer Approach to Energy Balancing in Wireless Sensor Networks. In *Workshop on Networked Embedded Sensing and Control (NESC'05)*, Notre Dame, IN, October 2005.
 - [52] M. Qin and R. Zimmermann. VCA : An Energy-Efficient Voting-Based Clustering Algorithm for Sensor Networks. *Journal of Universal Computer Science*, 12(1), 2007.
 - [53] K. Sha and W. Shi. Modeling the Lifetime of Wireless Sensor Networks. *Sensor Letters*, 3 :126–135, 2005.
 - [54] S. Soni and N. Chand. Energy Efficient Multi-Level Clustering to Prolong The Lifetime of Wireless Sensor Networks. *Journal of Computing*, 2 :158–165, May 2010.
 - [55] S. Soro and W. Heinzelman. Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Networks via Unequal Clustering. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (IEEE WMAN '05)*, April 2005.
 - [56] 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*, pages 32–41, Atlanta, USA, October 2002. ACM Press.
 - [57] W. Wei, V. Srinivasan, and K.-C. Chua. Using Mobile Relays to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of ACM MobiCom 2005*, pages 270–283, Cologne, Germany, August 2005.
 - [58] M. Ye, C. Li, G. Chen, and J. Wu. EECS : An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. *International Journal of Ad Hoc and Sensor Wireless Networks*, pages 535–540, April 2005.

- [59] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. An Energy-Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE Infocom*, pages 1567–1576, New York, NY, USA, June 2002. IEEE.
- [60] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52 :2292–2330, August 2008.
- [61] O. Younis and S. Fahmy. HEED : A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 3(4) :366–379, October-December 2004.
- [62] O. Younis, M. Krunz, and S. Ramasubramanian. Node clustering in wireless sensor networks : Recent developments and deployment challenges. *IEEE Network Magazine*, 20 :20–25, 2006.
- [63] W. Zhou, H.-M. Chen, and X.-F. Zhang. An Energy Efficient Strong Head Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks. In *Proc. International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom)*, pages 2584–2587, Sept. 2007.