

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté des Sciences Exactes
Département Informatique



Mémoire de fin de cycle

Présenté par :

Allouache Djedjiga & Azamoum Karima

Pour l'Obtention du Diplôme de Master II en Informatique

Option : Réseaux & Systèmes Distribués

Thème

**Optimisation de la consommation d'énergie dans les
réseaux de capteurs sans fil**

Soutenue le 25 Juin 2014

Devant le jury composé de :

M^r TOUAZI Djoudi

Université de Béjaïa

Président.

M^r BAADACHE Abderrahmane

Université de Béjaïa

Rapporteur.

M^r SAADI Mustapha

Université de Béjaïa

Examineur.

M^r MOUMEN Hamouma

Université de Béjaïa

Examineur.

Année Universitaire : 2013/2014.

Remerciements

Louange a dieu, le miséricordieux, sans lui rien de tout cela n'aurait pu être.

Nous tenon à répéter nos remerciements les plus forts à Mr A.BADACHE, pour ses conseils et son soutien qui ont fait beaucoup la différence au long de la préparation de ce mémoire et nous ont aidé à le finaliser.

Notre gratitude va aussi aux membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Un énorme merci à nos familles et amis pour leurs éternel soutien et la confiance qu'ils ont en nos capacité.

Nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail. Qu'ils trouvent tous ici l'expression de nos sincères considérations.

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents,
A toute ma famille.

AZAMOUM Karima

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents,

A mes frères nabil, nassim et mes sœurs fariza, lydia,

A toute la famille,

A ma binôme Karima et sa famille.

A mes amis, collègues et à toutes les personnes que j'ai connues, et tout ceux qui m'ont aidé.

ALLOUACHE Djedjiga

TABLE DES MATIÈRES

Table des Matières	i
Liste des tableaux	iii
Table des figures	v
Liste des abréviations	vi
Introduction Générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils	3
1.1 Introduction	3
1.2 Nœud capteur	3
1.2.1 Architecture d'un nœud capteur	4
1.2.2 Modèles de capteurs	6
1.3 Réseaux de capteurs sans fil	6
1.3.1 Définition d'un réseau de capteur sans fil	7
1.3.2 Architectur d'un réseau de capteur sans fil	7
1.3.3 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil	8
1.3.4 Facteurs de conception d'un réseau de capteur sans fil	9
1.3.5 Classification des réseaux de capteurs	12
1.3.6 Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil	13
1.4 Conclusion	16
2 Routage à basse consommation d'énergie dans les RCSFs.	17
2.1 Introduction	17

2.2	Conception de protocoles de routage	17
2.3	Classification des protocoles de routage pour les RCSFs	19
2.3.1	Protocoles de routage basés sur la structure du réseau	19
2.3.2	Classification selon l’initiateur de communication	22
2.3.3	Classification selon les fonctions des protocoles	23
2.3.4	Classification selon l’établissement de la route	26
2.4	Conclusion	28
3	Approches de minimisation de la consommation d’énergie dans les RCSFs.	29
3.1	Introduction	29
3.2	Notion de la durée de vie d’un réseau de capteurs	30
3.3	Formes de dissipation d’énergie	30
3.3.1	Énergie de capture	30
3.3.2	Energie de traitement	31
3.3.3	Energie de communication	31
3.4	Conservation d’énergie dans les RCSFs	34
3.4.1	Technique de <i>Duty-cycling</i>	35
3.5	Conclusion	40
4	Approche d’optimisation de la consommation d’énergie dans les RCSFs	42
4.1	Introduction	42
4.2	Modèle du réseau	43
4.3	Solution proposée	43
4.3.1	Hypothèses	43
4.3.2	Détail de la solution proposée	44
4.4	Simulation	47
4.4.1	Paramètres de simulation	47
4.4.2	Métriques de simulation	47
4.4.3	Résultats de simulation	48
4.5	Conclusion	52
	Conclusion Générale et Perspectives	53
	Bibliographie	vii

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Les différents types de capteurs [43].	6
3.1	Consommation d'énergie dans un capteur <i>Rockwell WINS</i>	31
4.1	Paramètres de simulation.	48

TABLE DES FIGURES

1.1	Exemple des nœud capteurs.	4
1.2	Architecture matériel d'un capteur.	4
1.3	Architecture d'un réseau de capteurs.	7
1.4	Pile protocolaire d'un réseau de capteurs.	11
1.5	Les RCSFs dans le domaine militaire.	13
1.6	Les RCSFs pour les applications sanitaires.	14
1.7	Les RCSFs pour les applications domestiques.	15
1.8	Les RCSFs pour la surveillance des applications environnementales.	15
1.9	Les RCSFs pour la surveillance des applications commerciales.	16
2.1	Classification des protocoles de routage.	19
2.2	Protocoles de routage à plat.	20
2.3	Topologie hiérarchique.	21
3.1	Modèle de consommation d'énergie.	34
3.2	Approches de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.	34
3.3	Les trames TDMA	36
4.1	Modèle du réseau.	43
4.2	schéma générale de notre proposition.	45
4.3	Déploiement des capteurs dans le réseau.	49
4.4	L'énergie moyenne restante.	50
4.5	La durée de vie du réseau.	51
4.6	Nombre de paquets.	52

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ADC	Analog to D igital C onverter.
B-MAC	B erkeley M AC.
CAP	Contention A ccess P eriod.
CFP	Collision F ree P eriod.
CH	Cluster H ead.
CSMA	Carrier S ense M ultiple A ccess.
CSMA/CA	CSMA Collision A voidance.
CTS	Clear T o S end.
C4ISR	C ommand C ontrol C ommunications C omputing I ntelligence S urveillance R econnaissance and T argeting.
DD	D irect D iffusion.
EAR	E nergy A ware R outing.
ECN	E xplicit C ontention N otification.
HCL	H igh C ontention L evel.
HEED	A H ybrid E nergy- E fficient D istributed clustering approach for ad-hoc sensor networks.
IEEE	Institute of E lectrical and E lectronics E ngineers.
GAF	G eographic A daptive F idelity.
GBR	G radient-Based Routing.
GEAR	G eographic and E nergy A ware Routing.
GPS	G lobal P ositioning S ystem.
GTS	G uaranteed T ime S lot.
LEACH	L ow- E nergy A daptive C lustering H ierarchy.

LLC	L ogical L ink C ontrol.
LPL	L ow P ower L istening.
LCL	L ow C ontention L evel.
MAC	M edium A ccess C ontrol.
PAN	P ersonal A rea N etworks.
PEGASIS	P ower-Efficient G Athering in S ensor I nformation S ystem .
QoS	Q uality of S ervice.
QoS	Q ualité de S ervice.
RCSF	R éseau de C apteurs S ans F il.
RF	R adio F requency.
RR	R umor R outing.
RTS	R equest T o S end.
SAR	S equential A ssignement R outing.
SB	S tation de B ase .
S-MAC	S ensor M AC.
SPIN	S ensor P rotocols for I nformation via N egotiation.
STEM	S parse T opology and E nergy M anagement.
TDMA	T ime D ivision M ultiple A ccess .
T-MAC	T imeout M AC.
TRAMA	T Raffic A daptive M edium A ccess.
Z-MAC	Z ebra M AC.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Un réseau de capteurs sans fil est un ensemble de nœuds déployés dans une zone capture pour mesurer des grandeurs physiques telles que la température, la pression, la vibration, etc. L'information captée est ensuite transmise vers la station de base, laquelle l'achemine à l'utilisateur final via un autre réseau de communication. Un tel réseau est utilisé dans plusieurs applications médicales, environnementales et militaires par exemple. Selon l'application, les capteurs peuvent être déployés d'une manière déterministe ou aléatoire. Le déploiement déterministe consiste à placer les nœuds capteurs dans des endroits bien déterminés, tandis que l'aléatoire consiste à disperser les capteurs dans une zone de capture sans que la position soit prédéfinie.

Dans un réseau de capteur sans fil, les capteurs sont alimentés par des sources d'énergie relativement faibles, généralement irremplaçables et ils sont déployés dans des zones difficilement accessibles. Ceci rend l'énergie une ressource critique à conserver le maximum possible pour prolonger la durée de vie du réseau de capteurs. A cet égard, plusieurs travaux de recherche se focalisant sur le problème de l'énergie ont été proposés dans la littérature. Ces travaux peuvent être des protocoles MAC avec contention, des protocoles MAC basés sur TDMA ou des protocoles hybrides. La majorité de ces protocoles essayent de minimiser la consommation d'énergie causée par l'écoute à un canal libre, la sur-émission, la retransmission, l'écoute active, la surcharge. Bien que multiples, ces protocoles ne sont pas suffisamment efficaces et robustes, ce qui nous a motivé de travailler sur la problématique de l'énergie afin de proposer une solution qui minimise la consommation d'énergie et prolonge la durée de vie du réseau en conséquence. Notre point de départ était l'étude analytique et critique des solutions existantes, ensuite, nous avons proposé une solution qui se base sur le principe des nœuds actifs/passifs et l'agrégation des données. L'idée clé est que les nœuds capteurs sont regroupés en cluster, et dans chaque cluster un nombre restreints de nœuds sont initialement actifs. Parmi ces nœuds actifs, un nœud

agrégateur est choisi. Ce dernier est responsable d'agréger les données envoyées par les autres nœuds actifs et envoyer le résultat d'agrégation au cluster head. Bien évidemment, un processus de remplacement des nœuds actifs par des nœuds passifs est déclenché dès que l'énergie d'un nœud actif s'épuise. Dans notre solution l'énergie est conservée dans deux aspects. Premièrement, les données captées sont agrégées ce qui minimise le nombre de messages transmis et préserve l'énergie des nœuds en conséquence. Le deuxième aspect est qu'un nombre restreint de nœuds (nœuds actifs) participent dans les opérations du réseau, ce qui prolonge davantage la durée de vie du réseau. Par simulation, nous avons évalué la performance de notre solution en termes de consommation d'énergie et durée de vie du réseau. Les résultats montrent que la solution proposée est efficace et prolonge la durée de vie du réseau le plus longtemps possible.

Notre mémoire est structuré autour de quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons introduit les réseaux de capteurs, en particulier, l'architecture d'un réseau de capteur, ses caractéristiques ainsi que ses applications ont été présentées. Le chapitre deux quant à lui présente le routage dans un réseau de capteurs, en particulier, la taxonomie des protocoles de routage à basse consommation d'énergie a été explorée. Le chapitre trois constitue un état de l'art des différentes solutions de minimisation de la consommation d'énergie proposées dans la littérature. Dans le chapitre quatre, nous avons détaillé la solution proposée, analyser et discuter les résultats de simulation. Enfin, le mémoire s'achève par une conclusion, dans laquelle notre contribution a été résumée et les perspectives de notre travail ont été soulignées.

CHAPITRE 1

GENÉRALITÉ SUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

1.1 Introduction

Un réseau de capteurs est un ensemble de nœuds déployés dans une zone de capture pour mesurer des grandeurs physiques telles que : la température, la pression, la vibration, etc. Les données collectées par ces capteurs sont envoyées à une station de base et acheminées par cette dernière vers l'utilisateur final via un autre réseau de communication. Ce type de réseau est utilisé par plusieurs applications militaires et civiles telles que la santé, la surveillance, l'industrie, le transport, etc. Ces applications ont des exigences plus ou moins différentes, particulièrement, en termes de sécurité et conservation d'énergie.

Ce chapitre est organisé en quatre sections. Dans la section 1.2, nous présentons l'architecture et les modèles d'un nœud capteur. La section 1.3 introduit les réseaux de capteurs, en particulier, leur architecture et caractéristiques, les facteurs pris en compte dans la conception de ce genre de réseau, la classification ainsi que les domaines d'applications. Le chapitre s'achève par une conclusion dans la section 1.4.

1.2 Nœud capteur

Un capteur est un petit appareil, comme illustré dans la Figure 1.1 autonome capable d'effectuer de simples mesures sur son environnement immédiat, telles que la température, les vibrations et la pression. Cet appareil est augmenté de capacités de calcul et de communication ainsi que de batteries lui conférant une autonomie.

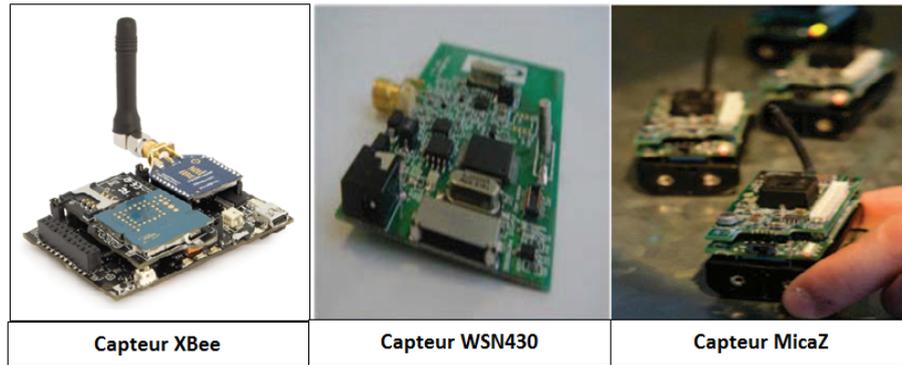


FIGURE 1.1 – Exemple des nœud capteurs.

1.2.1 Architecture d'un nœud capteur

L'architecture d'un capteur comprend deux parties : matériel et système d'exploitation embarqué.

- **Matériel**

Un nœud capteur est composé de quatre unités [1] ou sous-systèmes principaux (Figure 1.2). Il s'agit des sous-systèmes de traitement, de communication, de capture ou de perception, et de contrôle d'énergie [1, 8, 9]. Il peut contenir également un ensemble supplémentaire de modules selon le domaine d'application, comme le système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité, un générateur d'énergie [1, 8], ainsi qu'un système de localisation GPS (*Global Positioning System*) [10].

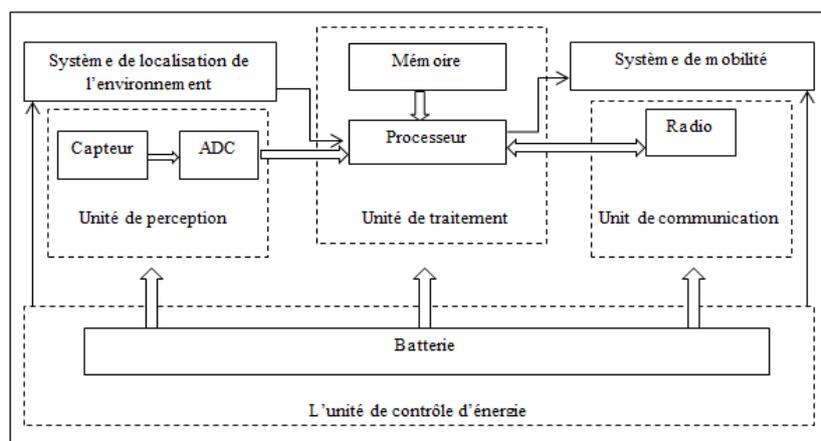


FIGURE 1.2 – Architecture matériel d'un capteur.

- **Unité de capture** : est composée de deux sous-unités : un capteur et un convertisseur Analogique/Numérique (ADC pour *Analog to Digital Converter*) [11]. Le capteur permet

de relier le nœud avec son environnement extérieur, il est responsable de fournir des signaux analogiques, basé sur les phénomènes observés à l'ADC. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement pour pouvoir l'analyser.

- **Unité de traitement** : est à la charge du contrôle des capteurs, la gestion des procédures et protocoles de communication [1, 12]. De plus le microcontrôleur ou le microprocesseur embarqué est associé généralement à une unité de stockage, nécessaire à l'implantation et à l'exécution d'un programme qui peut être un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs (*TinyOS* par exemple).

- **Unité de communication** : responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions de données sur un médium sans fil, afin de permettre l'échange d'informations entre le nœud capteur et son environnement extérieur. En fonction du domaine d'application, trois modes de communication sans fil peuvent être utilisés : optique (*laser*), infrarouge, radiofréquence (RF *Radio Frequency*) [13].

- **Unité d'énergie** : c'est la batterie qui est, généralement, ni rechargeable ni remplaçable. Cette capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs, représente une contrainte cruciale lors de la conception de protocoles pour les réseaux de capteurs. Par ailleurs, les unités d'énergie rechargeable : supportées par des photopiles (cellules solaire) [1] permettant de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique et d'étendre la durée de vie de la batterie.

- **Système d'exploitation**

Un système d'exploitation n'est qu'un ensemble de programmes responsable d'assurer l'exploitation des ressources matérielles d'un dispositif par les applications utilisatrices. Le système d'exploitation destiné aux réseaux de capteurs est de petite taille, mais il doit présenter plus de performance en termes de temps d'exécution, occupation mémoire et gestion d'énergie. Le système d'exploitation le plus répandu pour les réseaux de capteurs est : *TinyOS*.

TinyOS est un système d'exploitation *open-source* conçu pour les RCSFs. Il a été développé à l'université de Berkely pour des applications qui fonctionnaient sur des dispositifs tels que les grains (*motes*) de Berkely. Actuellement, il est utilisé par plus de 500 universités et centre de recherche dans le monde [22, 3, 23]. *TinyOS* respecte une architecture basée sur une association

de composants, réduisant la taille du code nécessaire à sa mise en place.

Cela s'inscrit avec l'utilisation du langage de programmation NESC (syntaxiquement proche du C) [24]. Sa bibliothèque de composants est particulièrement complète puis qu'elle inclut des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. L'ensemble de ces composants peut être utilisé tels qu'ils sont ; comme ils peuvent être aussi adaptés à des applications précises [1]. En s'appuyant sur un fonctionnement événementiel, TinyOS propose une gestion très précise de la consommation d'énergie du capteur et permet une meilleure adaptation à la communication sans fil [23].

1.2.2 Modèles de capteurs

Les capteurs sont disponibles en différents modèles et dépendants de l'application à laquelle ils sont destinés. Il existe plusieurs fabricants de capteurs parmi lesquels on trouve : *Imote IV*, *Art of Technology* et *Crossbow* [44]. Les différents capteurs : MICA2, Telos B, MICAz, Imote2, IRIS, etc. Les différents composants de chaque modèle ainsi que leurs caractéristiques sont décrit dans le Tableau 1.1.

Propriétés TYPE	Module radio	Procésseur	RAM	Flash OM	EEPR	Taille	Batterie
TelosB	-TPR 2420CA -EEE 802.15.4 250KB/S -Bande 2.4-2.48 GHZ	-8Mhz TI MSP430	10KB	48KB	16KB	65*31*6 (mm)	2*AA
Imote	-TICC 2420 EEE 802.15.4 250Kb/S variable :13 à416MHZ	-Intel PXA 271 Fréquence	256kB	32Mb	32MB	26*48*9 (mm)	3xAAA 3.2 à 3.3 v
MICA2	-EEE 802.15.4 38.4kb/s 4-50 canaux sur une bande 868-91MHZ	A Tmega 1281 XMR400CB	4KB 4KB	128kb 128kb	4kB 4kB	2* AA 58*32*7 (mm)	2.7à3.3 v
IRIS	-EEE802.15.4 250 kb/s bande 2.4-2.48 GHZ	ATmega 1281 XM2110CA	8KB	128kb	58*32*7 4kB	2* AA (mm)	2.7à3.3 v
MICAz	-250KB/s Bande 2.4-2.48 GHZ	ATmega 128L MPR2400	4KB	128KB	4KB	58*32*7	2*AA 2.7à3.3 v

TABLE 1.1 – Les différents types de capteurs [43].

1.3 Réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des technologies de la nouvelle génération de réseaux informatiques et télécommunications.

1.3.1 Définition d'un réseau de capteur sans fil

Un réseau de capteurs sans-fil est considéré comme un type spécial des réseaux ad hoc ou l'infrastructure fixe de communication et d'administration centralisée sont absentes et les nœuds jouent, à la fois, le rôle des hôtes et des routeurs. Les nœuds capteurs sont des capteurs intelligents (*smart sensor*), capables d'accomplir trois tâches complémentaires : le prélèvement d'une grandeur physique, le traitement éventuel de cette information et la communication avec d'autres capteurs. L'ensemble de ces capteurs déployés de manière aléatoire pour une application, forme un réseau de capteurs [14].

1.3.2 Architectur d'un réseau de capteur sans fil

Les noeuds capteurs sont souvent dispersés dans une zone géographique, appelée champs de capture qui définit la zone d'intérêt pour le phénomène observé. Les données captées sont acheminées au point de collecte comme montré dans la Figure 1.3 [6]. La station de base ou le nœud puits constitue une passerelle entre le réseau de capteurs et l'utilisateur final. Ainsi, l'usager peut surveiller et commander l'environnement à distance via l'Internet ou un satellite, en adressant des requêtes précisant le type de données requises à collecter aux autres nœuds du réseau via le nœud puits [7].

Les stations de base possèdent beaucoup plus de capacités que les capteurs tant au niveau de la mémoire que de la vitesse de traitement ou des réserves en énergie [1].

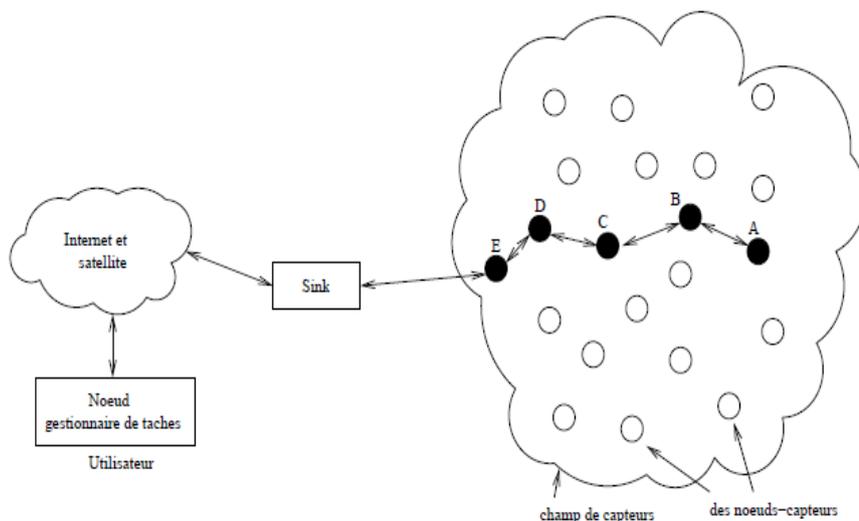


FIGURE 1.3 – Architecteur d'un réseau de capteurs.

1.3.3 Caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sont caractérisés par :

- **Forte densité des nœuds** : les RCSFs peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. La densité de nœud peut être aussi haute que 20 nœuds/m³ [15].
- **Ressources limitées** : les capteurs sont des objets limités en termes de : capacité mémoire, puissance de traitement, bande passante et énergie.
- **Contrainte d'énergie** : dans plusieurs applications, les nœuds capteurs sont déployés dans des environnements hostiles. Dans ce cas, la durée de vie du capteur dépend de la vie de sa batterie, ce qui exige la minimisation des dépenses énergétiques. De ce fait, l'énergie est une contrainte clé dans les réseaux de capteurs [16, 18].
- **Déploiement de nœuds** : il existe, en effet, plusieurs stratégies pour déployer un réseau de capteurs dans la zone à surveiller. Le choix d'une de ces stratégies dépend de l'objectif du réseau. Le déploiement peut être déterministe ou aléatoire. Dans la première stratégie, les capteurs sont placés manuellement et les données sont conduites via des chemins prédéterminés, mais cette solution devient impossible dès qu'on considère un très grand nombre de capteurs. En revanche, avec une approche aléatoire, les capteurs sont dispersés (exemple : lâchés d'un avion). Enfin, un mélange de ces deux techniques peut être envisagé [7, 16].
- **Connectivité** : la densité élevée de nœud dans les réseaux de capteurs exclue complètement leur isolement. Quoique, la connexion n'est pas toujours assurée à cause de la mobilité, le déploiement et les défaillances qui font varier la topologie du réseau [6, 7].
- **Couverture limitée** : dans les réseaux de capteurs, chaque nœud obtient une certaine vue locale de l'environnement, limitée par sa portée et sa précision. La couverture d'une vaste surface déterminée est composée de l'union de nombreuses couvertures de petite taille [6, 7].
- **Auto organisation du réseau et la topologie dynamique** : ceci peut être nécessaire, vu le grand nombre de nœuds de micro-capteurs et leur placements dans des endroits hos-

tiles, où l'intervention humaine n'est pas faisable. D'ailleurs, les nœuds peuvent échouer (par manque d'énergie ou destruction physique), comme de nouveaux nœuds peuvent rejoindre le réseau. Par conséquent, le réseau doit être capable de s'auto-organiser et de se modifier périodiquement de sorte qu'il puisse continuer à fonctionner [19].

- **Sécurité physique limitée** : à l'instar des réseaux ad hoc, les RCSFs sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques [20, 21].

1.3.4 Facteurs de conception d'un réseau de capteur sans fil

Plusieurs facteurs et contraintes interviennent dans la conception d'un réseau de capteurs sans fil :

- **Tolérance aux pannes** : La défaillance ou le blocage des nœuds dans un réseau de capteurs peut être engendré par plusieurs causes, notamment l'épuisement d'énergie, l'endommagement physique ou les interférences liées à l'environnement. La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'habilité du réseau à maintenir ses fonctionnalités sans interruptions provoquées par la panne des capteurs. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau [1, 19].
- **Facteur d'échelle (scalabilité)** : La surveillance d'un phénomène peut nécessiter le déploiement d'un nombre de nœuds qui est de l'ordre de plusieurs milliers de capteurs. Les nouveaux schémas doivent pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre de capteurs élevé [1, 19].
- **Coût de production** : Le coût de production d'un seul micro-capteur est déterminant pour l'évaluation du coût global du réseau. Si ce dernier est supérieur à celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classiques, l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas financièrement justifiée. Par conséquent, réduire le coût de production jusqu'à moins de 1 dollar par nœud est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans fil [19].
- **Contraintes matérielles** : La plupart des algorithmes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil requièrent la connaissance de la localisation des nœuds avec une grande précision. Ceci exige l'intégration d'une unité consacrée au système de localisation dans

un nœud capteur. La conception des nœuds capteurs peut aller jusqu'à prévoir un système de mobilisation du capteur pour le déplacer en cas de nécessité. Toutes ces unités peuvent exiger leur intégration dans un boîtier de taille minimale inférieure à un centimètre cube, et avec un poids très léger [19].

- **Support de transmission** : Dans un réseau de capteurs multisaits, les nœuds capteurs sont liés par un support sans fil. Ces liens de communications peuvent être des liaisons radio, infrarouge ou optique [25].

- **Topologie du réseau** : Les caractéristiques de déploiement aléatoire, le fonctionnement autonome, et la fréquence élevée de pannes rendent la maintenance de la topologie d'un réseau de capteurs complexe. En effet, plusieurs centaines de capteurs sont déployés avec une densité pouvant être supérieure à 20 nœuds/m^3 , ceci exige une bonne gestion de la maintenance de la topologie du réseau déployé. Nous examinons, dans ce qui suit, les différents problèmes liés aux topologies des réseaux de capteurs et leurs changements [19].
 - i. **Le pré-déploiement** : Les capteurs peuvent être éparpillés (manuellement ou par avion) ou placés précisément (manuellement ou par robots).

 - ii. **Le post-déploiement** : A cause des pannes, des déplacements de capteurs ou d'obstacles mobiles. La topologie doit parfois être changée après le déploiement.

 - iii. **Le redéploiement** : Des nœuds peuvent être déployés dans un deuxième temps pour remplacer ceux qui tombés en panne. Là encore la topologie devra s'adapter [25].

- **Consommation d'énergie** : Les nœuds capteurs sont alimentés par des sources énergétiques limitées. Par conséquent, l'énergie d'un capteur doit être conservée pour augmenter sa durée de vie et la durée de vie du réseau tout entier en conséquence.

En général, dans un réseau de capteurs, l'énergie est consommée en trois opérations principales : la capture, la communication (émission et réception) et le traitement des données. La majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent sur le problème de conservation d'énergie afin de concevoir des algorithmes et protocoles spécifiques à ce genre de

réseau qui consomment le minimum d'énergie [19].

- **Pile protocolaire**

La pile protocolaire, utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs d'un réseau de capteurs (Figure 1.4) comprend cinq couches : couche application, couche transport, couche réseau, couche liaison de données et couche physique. Ainsi que Trois plans : plan de gestion d'énergie, plan de gestion de mobilité et plan de gestion des tâches.

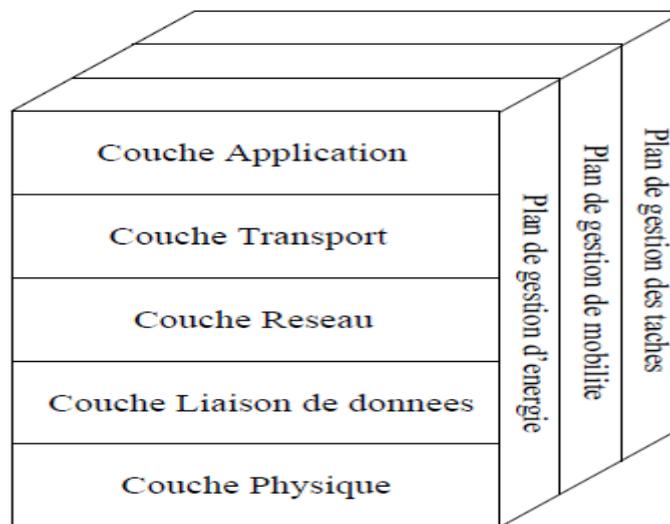


FIGURE 1.4 – Pile protocolaire d'un réseau de capteurs.

- **Couche physique** : doit assurer des techniques d'émission, de réception et de modulation de données d'une manière robuste.
- **Couche liaison de données** : cette couche doit garantir une faible consommation d'énergie en minimisant le taux de collision entre les données diffusées par les nœuds voisins. Elle est composée d'une couche de contrôle des liens logiques (LLC pour *Logical Link Control*) et une couche de contrôle d'accès au médium (MAC pour *Médium Access Control*).
- **Couche réseau** : cette couche assure l'opération de routage qui consiste à découvrir les chemins des données.

- **Couche transport** : La couche transport aide à gérer le flux de données si le réseau de capteurs l'exige. Elle permet de diviser les données issues de la couche application en segments pour les délivrer, ainsi elle réordonne et rassemble les segments venus de la couche réseau avant de les envoyer à la couche application.

- **Couche application** : cette couche permet à l'utilisateur d'interagir avec le réseau de capteurs à travers des interfaces. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par logiciels.

- **Plan de gestion d'énergie** : Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs. Dès lors, un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de capture [1].

- **Plan de gestion de mobilité** : Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, d'une manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, et le nœud peut garder trace de l'emplacement de ses voisins. En connaissant l'emplacement des voisins, les nœuds peuvent équilibrer l'usage de leur énergie.

- **Plan de gestion de tâche** : Le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau [1].

1.3.5 Classification des réseaux de capteurs

Il existe deux grands types de réseaux de capteurs sans fil :

1. Le réseau est constitué d'un ensemble de capteurs mobiles évoluant dans un environnement statique. Le but d'un tel réseau, dans la plupart du temps, est l'exploration de zones hostiles, inaccessibles ou dangereuses. Les travaux de recherches sont souvent orientés ro-

botiques [26, 27] les nœuds jouant à la fois le rôle de capteur et d'actionneur.

2. Le réseau est constitué de capteurs fixes servant à la surveillance d'occurrence d'évènements sur une zone géographique [28, 29]. Ici le réseau n'effectue que la surveillance, les données mesurées sont transmises en mode multi-sauts au nœud puits qui est chargé de mettre en oeuvre les actions nécessaires. Ce puits peut être connecté, de manière filaire par exemple, à un autre réseau [26, 30, 31].

1.3.6 Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil

L'intérêt des réseaux de capteurs est réellement vu à travers l'éventail très large des domaines d'applications. Les applications des réseaux de capteurs peuvent être classées en cinq familles [35].

- **Applications militaires :** Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être considérés comme une partie intégrale des systèmes C4ISRT (*Command, Control, Communications, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting*) (Figure 1.5). Nous pouvons citer parmi les applications militaires : la surveillance du champ de bataille, examen des forces et terrains de l'ennemi, estimation des dégâts de la bataille, et la détection et reconnaissance des attaques nucléaires, biologiques et chimiques [36].



FIGURE 1.5 – Les RCSFs dans le domaine militaire.

- **Applications médicales :** La surveillance des fonctions vitales de l'être humain serait possible grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau.

Actuellement, des micro-caméras qui peuvent être avalées existent. Elles sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain Figure 1.6.

L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine de la médecine pourrait apporter une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de quelques maladies [37].

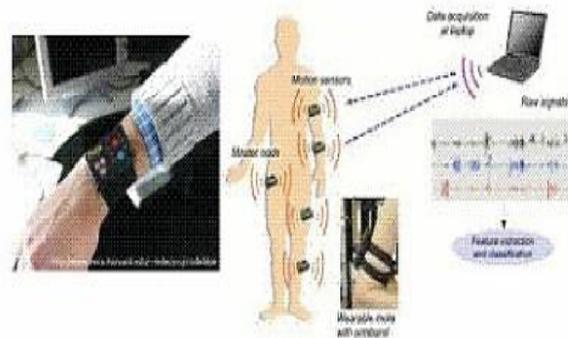


FIGURE 1.6 – Les RCSFs pour les applications sanitaires.

- **Applications domestiques** : Comme la technologie progresse, les nœuds capteurs intelligents et actionneurs peuvent être embarqués dans des dispositifs, comme l'aspirateur, micro-onde, réfrigérateurs. Ces capteurs dans les dispositifs domestiques peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe par Internet ou satellite. Ils permettent à l'utilisateur final de gérer les dispositifs domestiques localement ou à distance plus facilement [36].

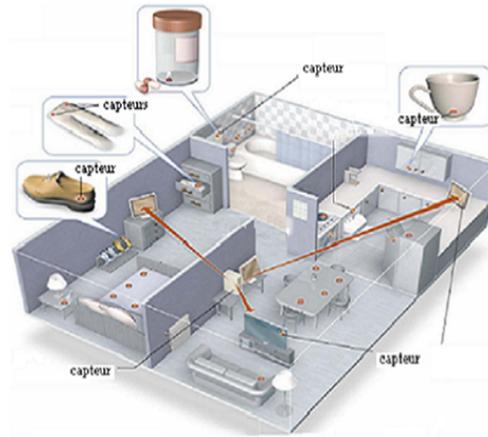


FIGURE 1.7 – Les RCSFs pour les applications domestiques.

- **Applications environnementales** : Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés dans les champs agricoles, sur les sites industriels, dans les centrales nucléaires, dans les pétroliers, dans les forêts ou pour la surveillance de l'environnement marin (Figure 1.8).



FIGURE 1.8 – Les RCSFs pour la surveillance des applications environnementales.

- **Applications commerciales** : Pour les entreprises, les réseaux de capteurs permettront de suivre le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré [36].



FIGURE 1.9 – Les RCSFs pour la surveillance des applications commerciales.

1.4 Conclusion

Un réseau de capteurs est une collection de capteurs déployés dans une zone de capture pour prélever des mesures physiques. Dans ce chapitre, nous avons introduit ce type de réseau, en particulier, nous avons présenté l'architecture, les caractéristiques, les facteurs influant sur la conception des réseaux de capteurs, ainsi que les domaines d'applications de ce genre de réseau. Il a été constaté que la recherche dans les réseaux de capteurs est beaucoup plus orientée vers la conservation de l'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau. A cette fin, le routage est considéré comme l'un des aspects les plus importants à étudier. Dans le chapitre suivant, nous allons mettre l'action sur le routage et ses techniques dans les réseaux de capteurs.

CHAPITRE 2

ROUTAGE À BASSE CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

2.1 Introduction

En général, le routage consiste à trouver un chemin entre une source de données et le destinataire de ces données. Dans les réseaux de capteurs, un protocole de routage doit assurer l'efficacité énergétique, pour cela il faut maintenir les routes sans dépenser trop d'énergie et il doit tenir compte du type de communications induite par l'application. Outre le fait que la quantité de données échangées est très faible par rapport aux applications de types réseaux ad hoc, notons que le trafic est particulièrement prévisible puis qu'il va des nœuds vers la station de base ou du la station de base vers les nœuds.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter les facteurs de conception de protocoles de routage, ensuite, nous présentons la classification des protocoles de routage pour les RSCFs.

2.2 Conception de protocoles de routage

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour concevoir un protocole de routage dans les réseaux de capteurs, parmi ces facteurs, nous citons :

- **Déploiement des capteurs** : Le déploiement des nœuds capteurs peut s'effectuer d'une manière déterministe ou aléatoire. Dans le déploiement déterministe, les capteurs sont placés manuellement et les données sont toujours acheminées via une route prédéterminée et fixe. Par contre, le déploiement aléatoire consiste à disperser aléatoirement les nœuds capteurs dans la région de capture, créant ainsi une infrastructure ad hoc [19]. Il

est évident que le type de déploiement des nœuds capteurs est un facteur déterministe dans la conception de tout protocole de routage.

- **Hétérogénéité noeud/liens** : De nombreux travaux supposent que les nœuds d'un réseau de capteurs sont homogènes et ayant les mêmes capacités en termes de calcul, de transmission et d'énergie disponible. Cependant, selon l'application, un nœud capteur peut avoir des rôles différents, par exemple, un chef de cluster doit être plus puissant que les capteurs normaux en termes d'énergie, bande passante et mémoire, car il est responsable de l'agrégation et la transmission des données captées au nœud puits. Donc, il est clair que l'existence d'un ensemble de capteurs hétérogènes soulève beaucoup de questions techniques liées à la conception des protocoles de routage [19].

- **Mobilité** : Le routage dans des environnements mobiles devient très difficile, car il faut acheminer des paquets de et vers des nœuds mobiles. Dans ce cas, la stabilité des chemins devient un défi aussi important que la conservation d'énergie.

- **Tolérance aux fautes** : Quelques nœuds capteurs peuvent être en panne ou endommagés. La défaillance des nœuds capteurs ne devrait pas affecter le fonctionnement du réseau de capteurs. Si plusieurs nœuds sont en panne, les protocoles de routage doivent s'adapter pour former de nouveaux liens et garantir l'acheminement des données collectées au nœud puits [38].

- **Scalabilité** : Le nombre des nœuds déployés dans un réseau de capteurs peut être de l'ordre de centaine ou de milliers selon l'application. Un protocole de routage doit fonctionner efficacement malgré le nombre important de nœuds capteurs déployés [81].

- **Couverture** : Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud capteur a une certaine vue de l'environnement. Cette vue est limitée dans la portée et dans l'exactitude, elle peut couvrir une partie bien limitée de l'environnement. Par conséquent, la couverture d'une région est également un paramètre important dans la conception d'un protocole de routage pour les réseaux de capteurs [81].

- **Qualité de service (QoS)** : Certaines applications des réseaux de capteurs ont des exigences plus ou moins strictes en termes de qualité de service concernant le temps de latence, la bande passante et la consommation d'énergie par exemple. Un protocole de

routage doit tenir en compte ces paramètres pour offrir la qualité de service exigée par l'application [81].

- **Agrégation des données** : L'agrégation de données est la combinaison des données de différentes sources selon une certaine fonction d'agrégation par exemple le minimum, le maximum et la moyenne, etc. Cette technique a été employée pour optimiser la consommation d'énergie lors de transfert des données dans un certain nombre de protocoles de routage [82].

2.3 Classification des protocoles de routage pour les RCSFs

Les protocoles de routage pour les RCSFs peuvent être classés selon plusieurs critères. La Figure 2.1 illustre une classification qui se base sur quatre critères : la structure du réseau, fonction du protocole, l'établissement de la route, l'initiateur de la communication [81].

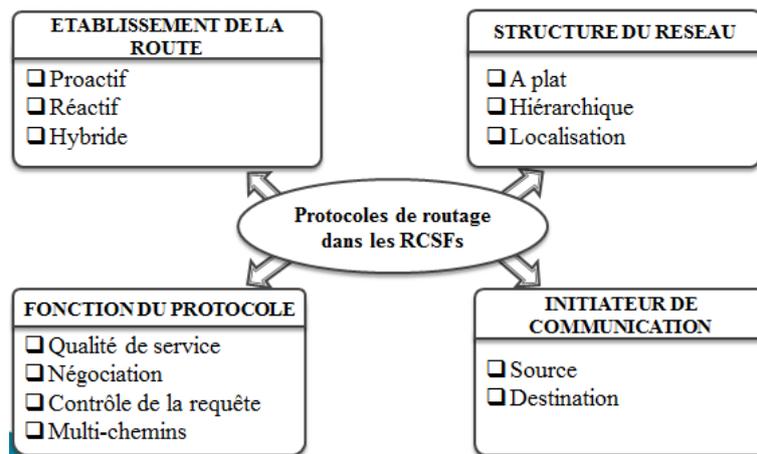


FIGURE 2.1 – Classification des protocoles de routage.

2.3.1 Protocoles de routage basés sur la structure du réseau

Les protocoles de routage basés sur la structure du réseau peuvent être classés en trois catégories : protocoles à plat (*Flat based routing*), protocoles hiérarchiques (*Hierarchic based routing/Clustering based routing*) et protocoles basés sur la localisation géographique (*Location based routing*).

2.3.1.1 Routage à plat

Comme illustré sur la Figure 2.2, dans cette catégorie de protocoles, les nœuds ont le même rôle et ils collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. En raison du grand nombre

de tels nœuds, il n'est pas faisable d'affecter un identificateur à chaque nœud [73, 83].

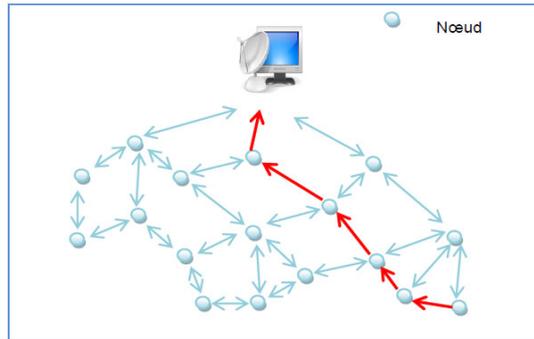


FIGURE 2.2 – Protocoles de routage à plat.

Avantages

- Les réseaux à plat sont scalables du fait que chaque nœud participe également à la tâche de routage et puisque les nœuds ont besoin seulement des informations sur leurs voisins directs.
- Les réseaux à plat permettent aux protocoles de routage d'être simples, ainsi que nous n'avons aucun besoin d'algorithmes complexes pour faire le choix d'un cluster-head.
- Le fait que les nœuds d'un réseau à plat ont le même rôle et les mêmes propriétés, les nœuds ont besoin juste de connaître seulement leurs voisins.
- La possibilité de réaliser un routage optimal réside de l'une de caractéristiques de routage à plat, celle que tous les nœuds peuvent communiquer entre eux sans avoir appel à un intermédiaire.

Inconvénients

- Si les nœuds capteurs sont uniformément distribués dans tout le réseau et il y a un seul nœud puits, Alors, les nœuds au tour de ce dernier épuiseront leurs énergies plus tôt que les autres nœuds Parce que tout le trafic du réseau passe par les nœuds entourant le nœud puits.

2.3.1.2 Routage hiérarchique

Comme illustré sur la Figure 2.3, dans une architecture hiérarchique, les nœuds sont regroupés en cluster et chaque cluster est orchestré par un cluster head ou chef de cluster. C'est ce dernier qui communique les données reçues des nœuds de son cluster à la station de base. Un protocole de routage doit être conçu de telle sorte qu'il prend en considération ce découpage hiérarchique pour assurer la bonne délivrance des paquets au destinataire [81, 73].

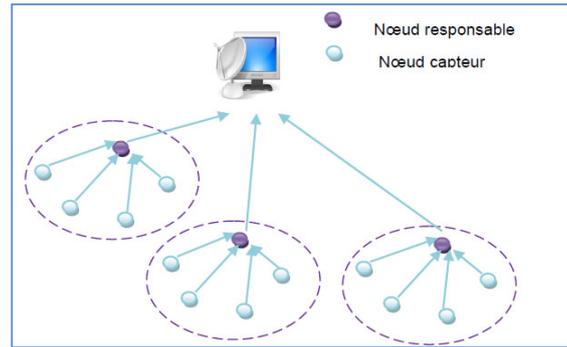


FIGURE 2.3 – Topologie hiérarchique.

Les protocoles suivants : LEACH, PEGASIS hiérarchique, LEACH-R sont des exemples de protocoles de routage hiérarchique.

Avantages

- L'avantage du routage hiérarchique est que les données sont envoyées vers la station de base par le cluster head, ce qui minimise considérablement l'overhead de communication.

Inconvénients

- Les nœuds élus comme des cluster-heads consomment plus d'énergie que les autres nœuds dans le réseau, car ce sont eux qui acheminent les données à la station de base.

2.3.1.3 Routage géographique

La plupart des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs nécessitent la localisation des nœuds capteurs. En général, ces informations sont nécessaires pour calculer la distance entre deux nœuds particuliers de sorte que la consommation d'énergie puisse être estimée. Puisque il n'y a aucun système d'adressage pour les nœuds dans les réseaux de capteurs (comme les adresses IP) et comme ils sont déployés dans une région d'une manière aléatoire, l'information de localisation de ces nœuds peut être utilisée dans le routage des données d'une manière efficace en termes d'énergie [74]. Les protocoles suivants : GAF, MFR, SPEED, TSRP sont des exemples de protocoles de cette classe.

Avantages

- Dans le routage basé sur la localisation géographique, la région de capture est connue et la requête peut être donc dirigée uniquement vers cette région, ce qui éliminera le nombre de transmission de manière significative.

- Avec les informations de positionnement, le réseau minimise de l'énergie grâce à la facilité de calcul des routes énergétiquement optimales.

Inconvénients

- Les nœuds doivent être équipés d'un système de localisation par satellite.
- Les réceptions GPS sont coûteuses en termes d'énergie et relativement peu précises.

2.3.2 Classification selon l'initiateur de communication

La communication dans un réseau de capteurs peut être initiée par les nœuds sources ou par les nœuds destinataires.

2.3.2.1 Communication lancée par la source

Dans les protocoles de communication lancés par la source, les nœuds envoient des données à la destination quand ils les ont capturées. Ces protocoles utilisent les données rapportées avec *time-driven* ou avec *event-driven*. Ceci signifie que les données sont envoyées à certains intervalles ou quand les nœuds capturent certains événements [75].

Les protocoles suivants : FLOODING, GOSSIPING, EAR, etc. sont des exemples de protocoles de cette approche de routage dont la communication est lancée par la source.

Avantages

- Établissement de la communication dans le réseau évite le problème d'overhead.
- L'efficacité énergétique due à l'absence des requêtes qui consomment beaucoup d'énergie générées par le nœud puits.

Inconvénients

- Les capteurs doivent avoir des informations sur les chemins qui conduisent à la station de base.
- Pour cette approche, l'énergie n'est pas la seule préoccupation, des exigences de QoS doivent en général être respectées (latence, fiabilité).

2.3.2.2 Communication lancée par la destination

Les protocoles de communication lancés par la destination utilisent les données rapportées avec *query-driven*, et dans ce cas, les nœuds répondent aux requêtes envoyées par la destination ou un autre nœud différent. C'est-à-dire propager les requêtes à tous les nœuds d'une région

topologique et attendre la réception des données du nœud capteur concerné dans cette région [75].

Les protocoles suivants : DD (*Direct Diffusion*), COUGAR, TEEN, etc. sont des exemples de protocoles de cette approche routage dont la communication est lancée par la destination.

Avantages

- L'envoi des requêtes décrivant les données requises par le nœud puits élimine la transmission inutile.

Inconvénients

- La circulation de messages requêtes de grande taille tend à épuiser les batteries des capteurs.
- Les délais entraînés par l'établissement des routes.

2.3.3 Classification selon les fonctions des protocoles

Les protocoles de routage peuvent être classifiés selon leurs fonctionnalités en quatre catégories : routage basé sur la Qualité de Service "QoS" (*Quality of Service "QoS" based routing*), routage basé sur le flux de données dans le réseau (*Network flow based routing*), routage basé sur des multi-chemins (*Multi-path based routing*), et routage basé sur la négociation (*Negotiation based routing*).

2.3.3.1 Routage basé sur la qualité de service

Dans cette catégorie, le réseau bascule entre l'énergie et la qualité des données transmises. Ces qualités de services peuvent être, le délai d'acheminement de bout en bout, la bande passante et le taux d'erreurs, afin de réaliser un routage équilibré en termes de consommation d'énergie et délivrance de données en temps réel. Pour cela, le réseau doit s'équilibrer entre la consommation d'énergie et la qualité des données [76,81].

Les protocoles suivants : SAR, SPEED sont des exemples de protocoles Routage basé sur la qualité de service.

Avantages

- La prise en compte des délais de transmissions rend les protocoles de cette approche très recommandés à des applications de surveillance (centres nucléaires, monitoring médical, applications militaires, etc.)
- La qualité des liaisons dans la communication assure la fiabilité des transmissions.

- Augmentation du taux d'arrivée des paquets au nœud puits.
- Répartition du trafic, d'une part, en équilibrant la charge en énergie, et d'autre part, en évitant les liens défaillants.

Inconvénients

- L'approche doit prendre en considération la contrainte d'énergie en parallèle avec les critères de la QoS.
- Pas de prise en compte de la sécurité qui est l'un des critères de la QoS.
- Le temps mis pour la découverte de chemin augmente le délai de bout en bout, chose non tolérée surtout pour les trafics très urgents.

2.3.3.2 Routage basé sur la négociation de données

Ces protocoles utilisent des descripteurs de données de niveau élevé afin d'éliminer les Transmissions de données redondantes par la négociation. Cette dernière est utilisée aussi pour prendre les décisions de communication en se basant sur les ressources [78].

Le protocole suivant : SPIN sont de exemple de protocole Routage basé sur la négociation de données.

Avantages

- Le mécanisme de négociation utilisé permet de réduire le taux de données redondantes transmises.
- La négociation entre les nœuds permet à eux de prendre des décisions adéquates suivant leurs ressources énergétiques disponibles.
- L'agrégation utilisée dans les protocoles basés sur la négociation réduit la largeur de la bande passante.

Inconvénients

- L'échange de messages de contrôle entre les nœuds cause la congestion du réseau ainsi qu'une perte additionnelle d'énergie.
- Le scénario de négociation entre les nœuds (déterminer les données et les acheminer produit un retard pour délivrer les données au nœud puits.

2.3.3.3 Routage multi chemins

Dans ce type de protocole, le routage permet de faire face à l'un des problèmes les plus rencontrés avec les protocoles de routage actuels. Le fait de trouver un simple chemin optimal en énergie et l'utiliser fréquemment pour toutes les communications provoque l'épuisement des batteries des nœuds qui constituent ce chemin. Par conséquent, le réseau sera partitionné et ses performances en termes de tolérance aux pannes seront dégradées. La tolérance aux pannes d'un protocole est mesurée par la probabilité qu'un chemin alternatif existe entre une source et une destination quand le chemin primaire soit défaillant.

De ce fait, le routage adopté par les protocoles de cette famille consiste à maintenir plusieurs chemins depuis chaque capteur vers le nœud puits, ce qui permet de garantir la présence de plus d'un chemin fiable pour la transmission, et offre une reprise rapide du transfert de données en cas de panne [73].

Les protocoles suivants : DD, EAR sont d'exemples des protocoles basés sur Routage multi chemins.

Avantages

- Un mécanisme d'équilibre de charge peut être utilisé pour la répartition du trafic sur les routes, ce qui permet de répartir l'utilisation des ressources des nœuds intermédiaires (énergie) et le débit sur les liens.
- L'augmentation de la fiabilité et de la robustesse par la possibilité d'existence de plusieurs routes entre la source et la destination.

Inconvénients

- Le risque de perte des paquets augmente dans le cas où ces derniers sont envoyés sur des chemins ayant des nœuds communs qui peuvent tomber en panne.
- La perte additionnelle d'énergie, due à l'envoi des messages périodiques pour maintenir les chemins alternatifs.

2.3.3.4 Routage basé sur le flux de données dans le réseau

Dans ce type de routage, l'établissement de routes est modélisé et résolu comme un problème de demande de flux de données où le flot représente la route que les paquets prennent, et la demande représente le taux auquel les paquets sont produits par les différents nœuds [81]. Les protocoles suivants : DD, RR (*Rumor Routing*) sont des exemples de protocoles de cette approche basée sur le routage de flux de données dans le réseau.

Avantages

- L'adaptation du trafic aux capacités énergétiques des liens et des capteurs.
- La durée de vie du réseau est présentée comme une fonction générale de tous les nœuds, dont l'objectif est de maximiser les durées de vie élémentaires des capteurs ainsi que la capacité du réseau.
- Répartition du trafic de façon à assurer l'équité en consommation d'énergie entre les nœuds.

Inconvénients

- Des informations sur la topologie du réseau sont indispensables, ce qui n'est pas adapté aux RCSFs à grande échelle.
- Cette approche est valable pour les RCSFs avec des topologies spécifiques (par exemple : un seul nœud origine).
- Cette technique est adoptée à des réseaux dont la topologie contient un seul nœud d'origine.

2.3.4 Classification selon l'établissement de la route

Suivant la manière de création et de maintenance des routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en trois catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides.

2.3.4.1 Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs essaient de maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles (qui peuvent représenter l'ensemble de tous les nœuds du réseau) au niveau de chaque nœud du réseau [79].

Les protocoles suivants : LEACH, PEGASIS, etc. sont des exemples de protocoles de cette approche basée sur le routage proactif.

Avantages

- Les routes sont établies à priori, ce qui facilite l'acheminement des données.

Inconvénients

- Les routes sont sauvegardées mêmes si elles ne sont pas utilisées.

- Les nœuds du réseau maintiennent des tables de routage pour toutes les destinations indépendamment de l'utilité des routes.
- La mise à jour de ces tables est assurée par la diffusion périodique des paquets de contrôle dans le réseau, ce qui induit un contrôle excessif surtout dans le cas des réseaux à grande taille.

2.3.4.2 Protocoles réactifs

Les protocoles de routage réactifs (dit aussi : les protocoles de routage à la demande) créent et maintiennent des routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte de route est lancée [79, 80].

Les protocoles suivants : DD, SPIN, COUGAR, ACQUIRE, etc. sont des exemples de protocoles de cette approche basées sur le routage réactif.

Avantages

- La conservation d'énergie est bien contrôlée par rapport aux protocoles proactifs.

Inconvénients

- Le routage à la demande induit une lenteur à cause de la recherche des chemins, ce qui peut dégrader les performances des applications interactives.

Il est impossible de connaître au préalable la qualité du chemin (en terme de bande passante, délais, etc).

2.3.4.3 Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour apprendre le proche voisinage (par exemple le voisinage à deux ou à trois sauts), ainsi, ils disposent des routes immédiatement dans le voisinage. Au de là de la zone de voisinage, le protocole hybride fait appel à un protocole réactif pour chercher des routes.

Les protocoles CBRP, ZRZ, APTEEN sont des exemples des protocoles de cette approche basée sur le routage.

2.4 Conclusion

Les avancées récentes dans les réseaux de capteurs sans fil ont mené à des nouveaux protocoles conçus spécifiquement pour ce type de réseaux dont la contrainte d'énergie est une considération essentielle. La conception de tel protocole de routage pour les RCSFs est influencée par plusieurs facteurs qui doivent être dépassés pour atteindre la communication efficace en termes d'énergie. Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art sur les protocoles de routage à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, en particulier les avantages et les inconvénients de ces protocoles .

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différentes approches de consommation d'énergie.

CHAPITRE 3

APPROCHES DE MINIMISATION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

3.1 Introduction

Dans un réseau de capteurs, l'énergie est la ressource la plus précieuse qui influe directement sur la durée de vie des capteurs et du réseau en entier. Ceci à cause de la limitation de la capacité énergétique des batteries qui alimentent les capteurs d'une part et la forte possibilité de ne pas remplacer ces batteries d'autre part. Maximiser la durée de vie du réseau revient donc à réduire la consommation énergétique des nœuds. Malgré la diversité des protocoles à basse consommation d'énergie qui ont été proposés, l'énergie dans un réseau de capteurs reste toujours un problème de recherche ouvert, ce qui nécessite d'autres solutions qui viennent renforcer et améliorer les solutions existantes.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un état de l'art sur les approches proposées dans la littérature pour minimiser la consommation d'énergie dans un réseau de capteur. En particulier, nous allons définir la durée de vie d'un réseau de capteurs, et énumérer les formes de dissipation énergétique, ensuite, nous allons résumer les différentes approches de minimisation de la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs.

3.2 Notion de la durée de vie d'un réseau de capteurs

Dans les réseaux de capteurs, l'efficacité en consommation d'énergie représente une métrique de performance significative, qui influe directement sur la durée de vie du réseau en entier [44, 45, 46]. Selon la discussion d'Akyildiz et al. [1], la quantité prédominante d'énergie consommée par un nœud capteur dépend essentiellement de l'énergie qu'il la consomme durant un certain temps et la quantité d'énergie dont il dispose. La vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle le réseau peut maintenir assez de connectivité ou garder le taux de perte d'information en-dessous d'un certain seuil.

L'épuisement de l'énergie d'une certaine proportion de nœuds avoir comme conséquence la non couverture d'une région et/ou le partitionnement du réseau. Les définitions de la durée de vie possibles qui sont proposées dans la littérature sont les suivantes :

- La durée jusqu'à ce que le premier nœud épuise toute son énergie [47, 48, 49, 50, 51].
- La durée jusqu'à ce qu'il reste au plus une certaine proportion de nœuds survivants dans le réseau [52, 53, 54].
- La durée jusqu'à ce que tous les nœuds capteurs épuisent leur énergie [55].

3.3 Formes de dissipation d'énergie

Le but d'un réseau de capteurs est de surveiller une zone, prendre des mesures et de les faire remonter vers un certains nœuds qui sont en mesure de relayer l'information à l'utilisateur final. Pour cela, les capteurs déployés utilisent leur énergie pour réaliser trois actions principales : la capture, le traitement des données captées et la communication (émission/réception) [12, 40, 41, 18]. Dans ce qui suit, nous allons détailler ces trois formes de dissipation d'énergie.

3.3.1 Énergie de capture

La capture est effectuée par les composants d'acquisition qui traduisent les phénomènes physique en signal électrique. La consommation d'énergie du module de détection dépend de la spécificité du capteur. Dans de nombreux cas, elle est négligeable par rapport à l'énergie consommée par les modules de traitement et communication. L'énergie consommée lors de la capture peut être réduite en utilisant des composants à faible consommation d'énergie. Une autre façon de réduire l'énergie consommée lors de la capture consiste à réduire la durée de capture et supprimer les captures jugées redondantes et inutiles [19].

3.3.2 Energie de traitement

L'énergie consommée durant le traitement des données peut être divisée en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un programme). Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication [19].

3.3.3 Energie de communication

L'énergie de communication (réception/émission) représente la plus grande proportion d'énergie totale consommée au niveau d'un nœud capteur. Cette énergie est fonction de la quantité des données à communiquer, la distance de transmission et les propriétés physiques du module 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.

Le Tableau 3.1 donne les consommations d'énergie d'un capteur WINS (*Rockwell-Science Centre* 2004) pour différentes fonctions : émission, réception, traitement, capture [43]. MCU désigne l'unité microcontrôleur (processeur+mémoire) du capteur.

MCU Mode	Mode Capteur	Mode Radio	Énergie totale (mW)
Allumé	Allumé	Tx transmission (puissance 36.3mW)	1080.5
Allumé	Allumé	Tx(puissance 0.12mW)	771.1
Allumé	Allumé	Rx réception	751.6
Allumé	Allumé	Radio est active mode " idle "	727.5
Allumé	Allumé	Sommeil	416.3
Allumé	Allumé	Supprimé	383.3
Sommeil	Allumé	Supprimé	64.0

TABLE 3.1 – Consommation d'énergie dans un capteur *Rockwell WINS*.

Lors de la communication, plusieurs facteurs interviennent dans la dissipation d'énergie, parmi ces facteurs, on cite :

3.3.3.1 Mode de livraison des données

Le mode de livraison de données a un impact direct sur le taux des données transmises et par conséquent sur la durée de vie du réseau [39]. La consommation d'énergie diffère d'un mode de livraison à un autre. Par exemple, dans une application de surveillance d'un évènement ou d'un objet, les nœuds doivent contrôler leurs radios continuellement, ce qui consomme plus d'énergie, par contre dans une application de surveillance de feu dans un forêt, les données transmises ne sont pas fréquentes, ce qui consomme moins d'énergie.

3.3.3.2 Module radio

Pour assurer la communication entre les éléments du réseau, les capteurs utilisent leurs modules radio. Ce module est le composant qui consomme le plus d'énergie. Il opère dans quatre modes de fonctionnement : actif, émission, réception et sommeil.

- **Mode actif** : le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état provoque une perte de l'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission.
- **Mode émission** : la radio transmet un paquet.
- **Mode réception** : la radio reçoit un paquet.
- **Mode Sommeil** : la radio est mise hors tension

3.3.3.3 Sources de surconsommation d'énergie

Dans ce qui suit, nous allons présenter les principales causes de consommation d'énergie au niveau de la couche MAC [40].

- **La retransmission** : Les nœuds capteurs partagent le même canal de transmission. Par ailleurs, la transmission simultanée des données provenant de plusieurs capteurs peut produire des collisions et ainsi une perte de l'information transmise. L'information perdue doit être retransmise, ce qui consomme davantage l'énergie.
- **L'écoute active** : L'écoute au canal de communication pour recevoir un éventuel paquet peut engendrer une perte importante de l'énergie des nœuds. Pour éviter ce problème, il faut chavirer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible.
- **La sur-écoute (*overhearing*)** : Le phénomène de sur-écoute se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. La sur-écoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données.
- **La surcharge (*overhead*)** : Généralement, les protocoles MAC [42] s'échangent de message de contrôle pour assurer les différentes fonctionnalités telles que : la signalisation, la connectivité et l'établissement d'un plan d'accès pour éviter les collisions. Tous ces messages échangés nécessitent une énergie additionnelle. Par exemple, les trames de contrôle RTS/CTS (*Request To Send/ Clear To Send*) ne véhiculent aucune informations alors que leur transmission consomme de l'énergie.
- **La surémission** : il s'agit du phénomène où le nœud capteur envoie les données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. Ces données envoyées inutilement consomment une énergie additionnelle considérable.

- **La taille des paquets :** La taille des paquets échangés dans le réseau a un effet sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni trop élevée ni trop faible. En effet, si elle est petite, le nombre de paquets de contrôle (acquiescement) générés augmente l'*overhead*. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour des paquets de grande taille.

3.3.3.4 Modèle de consommation d'énergie

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués dans le domaine de la radio à faible consommation énergétique. Heinzelman et al. [18] proposent un modèle (Figure 3.1) où la radio absorbe $E_{elec} = 50nJ/bit$ pour exécuter des circuits émetteur /récepteur et $E_{amp} = 100bit/m^2$ pour l'amplificateur de transmission. Ainsi, pour transmettre un message de k bits sur une distance d , la radio dépense :

$$E_{tx} = k \times E_{elec} + k \times E_{amp} \times d^2 \quad (3.1)$$

Pour recevoir un message de k bits le récepteur consomme :

$$E_{rx} = k \times E_{elec} \quad (3.2)$$

Où :

E_{elec} est l'énergie électronique.

E_{amp} est l'énergie nécessaire pour l'amplification.

Selon ce modèle, les protocoles doivent minimiser la distance de transmission et le nombre des opérations d'émission et de réception pour chaque message.

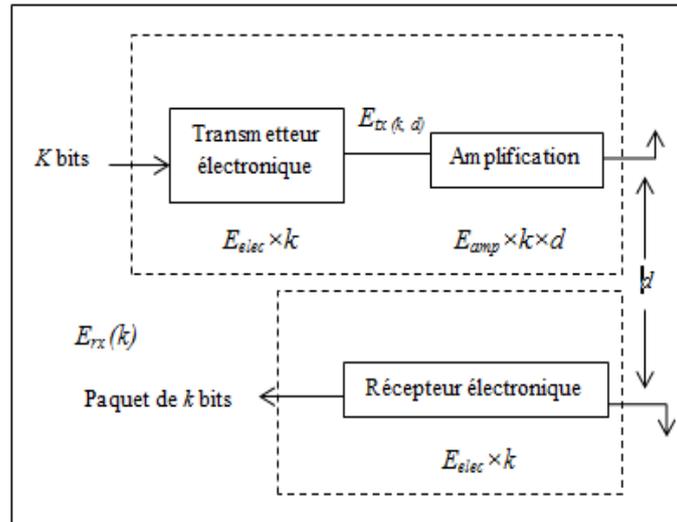


FIGURE 3.1 – Modèle de consommation d'énergie.

3.4 Conservation d'énergie dans les RCSFs

Il a été montré expérimentalement que la transmission des données est la fonction la plus consommatrice d'énergie, par contre les calculs consomment très peu [12]. En général, les techniques d'économie d'énergie se concentrent sur deux parties : la partie réseau où la gestion d'énergie est prise en compte dans les opérations de chaque nœud, ainsi que dans la conception de protocoles réseau, et la partie détection où des techniques sont utilisées pour réduire le nombre ou la fréquence de l'échantillonnage couteux en énergie. Nous présenterons dans ce qui suit les différentes approches proposées dans la littérature pour minimiser la consommation d'énergie. La Figure 3.2 schématise les techniques d'économie de l'énergie dans les réseaux de capteurs.

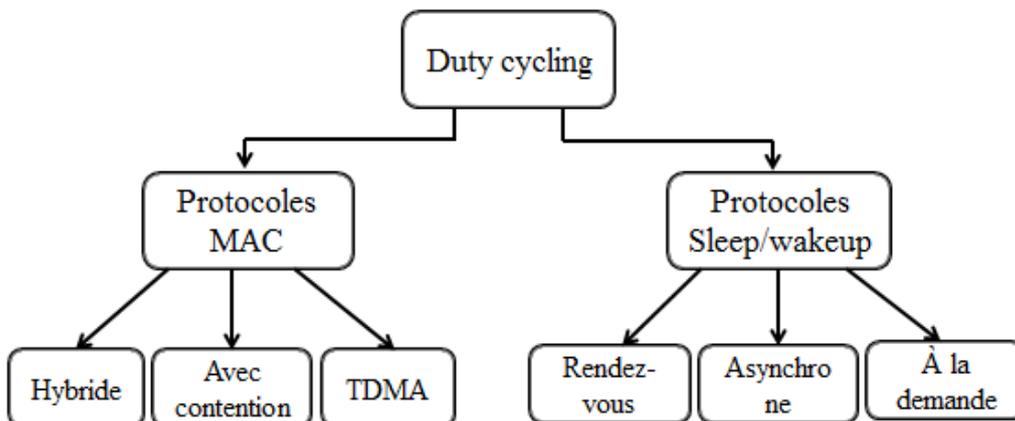


FIGURE 3.2 – Approches de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

3.4.1 Technique de *Duty-cycling*

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

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

3.4.1.1 Protocoles *Sleep/Wakeup*

Comme mentionné précédemment, le régime sleep/wakeup peut être défini pour un composant donné (i.e. le Module Radio) du nœuds capteur. On peut relever les principaux plans *sleep/wakeup* implantés sous forme de protocoles indépendants au-dessus du protocole MAC. Dans le document [77], les protocoles *sleep/wakeup* sont divisés en trois grandes catégories : à la demande, rendez-vous programmés, régimes asynchrones.

- Les protocoles à la demande utilisent l'approche la plus intuitive pour la gestion d'énergie. L'idée de base est qu'un nœud devrait se réveiller seulement quand un autre nœud veut communiquer avec lui. Le problème principal associé aux régimes à la demande est de savoir comment informer un nœud en sommeil qu'un autre nœud est disposé à communiquer avec lui. A cet effet, ces systèmes utilisent généralement plusieurs radios avec différents compromis entre énergie et performances (i.e. une radio à faible débit et à faible consommation pour la signalisation, et une radio à haut débit mais à plus forte consommation pour la communication de données). Le protocole STEM (*Sparse Topology and Energy Management*) [65], par exemple, utilise deux radios.
- Une autre solution consiste à utiliser une approche de rendez-vous programmés. L'idée est que chaque nœud doit se réveiller en même temps que ses voisins. Typiquement, les nœuds se réveillent suivant un ordonnancement de réveil et restent actifs pendant un

court intervalle de temps pour communiquer avec leurs voisins. Ensuite, ils se rendorment jusqu'au prochain rendez-vous.

- Enfin, un protocole *sleep/wakeup* asynchrone peut être utilisé, avec les protocoles asynchrones, un nœud peut se réveiller quand il veut et quand il est capable de communiquer avec ses voisins. Ce but est atteint par des propriétés impliquées dans le régime *sleep/wakeup*, aucun échange d'informations n'est alors nécessaire entre les nœuds. [66]

3.4.1.2 Protocole MAC pour les réseaux sans fil

Plusieurs protocoles MAC à basse consommation d'énergie ont été proposés dans la littérature. Ces protocoles peuvent être divisés en trois catégories. Protocoles MAC avec contention, protocoles MAC basés sur TDMA ou des protocoles MAC hybrides. Dans ce qui suit, nous décrire ces trois catégories et quelques exemples pour chaque catégorie.

1 - Protocoles MAC basés sur TDMA

Dans les protocoles MAC fondés sur la méthode TDMA [56, 57, 18, 58, 59], le temps est divisé en cycles (période de temps) et chaque cycle se compose d'un certain nombre de slots de temps. A chaque nœud, on attribue un ou plusieurs slots par cycle, selon un certain algorithme d'ordonnancement. Ces slots sont utilisés pour transmettre/recevoir des paquets de/vers d'autres nœuds.

Dans de nombreux cas, les nœuds sont regroupés pour former des clusters avec un cluster head qui est chargé d'attribuer les slots de temps pour les nœuds de son cluster (par exemple, Bluetooth [56], LEACH [18], et *Energy-aware TDMA-based* MAC [56]).

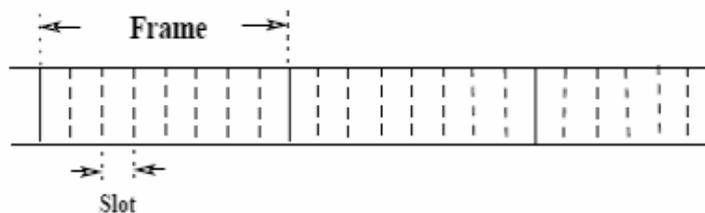


FIGURE 3.3 – Les trames TDMA

Avantages

- Les protocoles TDMA sont de nature efficace en énergie, puisque les nœuds n'allument leur radio que lors de leurs propre slots et s'endorment le reste de temps.

- Ce type de protocoles revient à limiter les problèmes de retransmission dû aux collisions (les collisions sont, ainsi, fortement réduites).

Inconvénients

- Cette solution présente l'inconvénient d'être peu flexible et de demander une synchronisation fine de capteurs.
- Les protocoles d'accès basés sur TDMA souffrent de latences élevées et d'une relative incompatibilité au trafic en rafale (*busty trafic*). De plus, une infrastructure hiérarchique basée sur les clusters est toujours nécessaire.

Exemple : TRAMA

Un des protocoles TDMA plus importante et l'efficacité énergétique des réseaux de capteurs sans fil est TRAMA [59]. TRAMA divise le temps en deux parties, une période avec un accès aléatoire et une période avec un accès ordonnancé. La période d'accès aléatoire est consacrée à la réservation des slots et l'accès au canal est fondé sur la contention. Au contraire, la période d'accès ordonnancée est constituée par un certain nombre de slots de temps attribués à un nœud précis.

L'algorithme de réservation des slots est le suivant. Tout d'abord, les nœuds cherchent des informations sur un voisinage à deux sauts, qui sont nécessaires pour établir un ordonnancement sans collisions. Ensuite, les nœuds commencent une procédure d'élection afin d'associer chaque slot à un seul nœud. Chaque nœud aura une priorité pour être le propriétaire d'un slot. Cette priorité est calculée avec une fonction de hachage de l'identifiant du nœud et du numéro du slot. Le nœud avec la plus grande priorité devient le propriétaire du slot. Enfin, les nœuds envoient un paquet de synchronisation contenant la liste des voisins destinataires pour les transmissions suivantes. Par conséquent, les nœuds peuvent se mettre d'accord sur les slots où ils doivent être éveillés. Les slots inutilisés peuvent être annoncés par leurs propriétaires pour être réutilisés par d'autres nœuds.

2 - Protocoles MAC avec contention

La plupart des protocoles MAC proposés pour les réseaux de capteurs sans fil sont des protocoles basés sur la contention. Les protocoles fondés sur la contention sont robustes et garantissent le passage à l'échelle. En outre, ils ont généralement un délai plus faible que ceux reposant sur TDMA et ils peuvent facilement s'adapter aux conditions de trafic. Malheureusement, leur dissipation d'énergie est plus élevée que celle des protocoles

TDMA à cause de la contention et des collisions.

Exemple : B-MAC, S-MAC, IEEE 802.15.4

- **B-MAC** : Un des protocoles les plus populaires est le protocole MAC avec contention B-MAC (*Berkeley MAC*) [71], a une faible complexité et de faible puissance, est livré avec le système [72] d'exploitation *TinyOS*. L'objectif de B-MAC est de fournir quelques fonctionnalités de base et un mécanisme efficace en énergie pour l'accès au canal. Il met d'abord en œuvre les caractéristiques de base du contrôle d'accès au canal : un algorithme de *backoff*, a une estimation efficace du canal et des acquittements optionnels. Deuxièmement, pour atteindre un faible *duty-cycle*, B-MAC utilise un plan *sleep/wakeup* asynchrone fondé sur l'écoute périodique appelée *Low Power Listening* (LPL). Les nœuds se réveillent périodiquement pour vérifier l'activité sur le canal. La période entre deux réveils est nommée intervalle de vérification. Après le réveil, les nœuds restent actifs pour un temps de réveil. Contrairement au temps de réveil qui est fixé, l'intervalle de vérification peut être spécifié par l'application. Les paquets B-MAC sont constitués d'un long préambule et d'une charge utile. La durée du préambule est au moins égale à l'intervalle de vérification, afin que chaque nœud puisse toujours détecter une éventuelle transmission au cours de son intervalle de vérification. Cette approche ne nécessite pas que les nœuds soient synchronisés. En fait, quand un nœud détecte l'activité sur le canal, il reste actif et reçoit le préambule en premier puis la charge utile.
- **S-MAC** : Un autre protocole MAC *multi-sauts* célèbre dans les réseaux de capteurs est S-MAC (*Sensor-MAC*) [70]. Il adopte un régime de communication avec planification par rendez-vous. Les nœuds échangent des paquets de synchronisation afin de coordonner leurs périodes *sleep/wakeup*. Chaque nœud peut établir son propre plan ou suivre le plan d'un voisin au moyen d'un algorithme distribué. Les nœuds utilisant le même plan forment un cluster virtuel. Un nœud peut éventuellement suivre deux plans s'ils ne se superposent pas, de sorte qu'il puisse faire un pont de communication entre différents clusters virtuels. Le temps d'accès au canal est divisé en deux parties. Dans la période d'écoute, les nœuds échangent des paquets de synchronisation et des paquets de contrôle pour éviter des collisions. Le transfert de données aura lieu dans le reste de la période. Les nœuds source et destination sont réveillées et communiquent entre eux. Les nœuds qui ne sont pas concernés par cette communication peuvent dormir jusqu'à la prochaine période d'écoute. Pour éviter les latences dans des environnements *multi-sauts*, S-MAC utilise un plan d'écoute

adaptatif. les périodes d'écoute et de sommeil, sont constantes et ne peuvent pas être modifiées après le déploiement. Les auteurs [69] proposent alors une version améliorée de S-MAC appelée *Timeout MAC* (T-MAC) et spécialement conçue pour une charge de trafic variable. En outre, la diffusion de données à partir d'un nœud vers la station de base peut connaître un problème d'interruption. En fait, la sensibilité de la radio limite la portée de l'*overhearing*. Les nœuds en dehors de la portée de l'émetteur ne peuvent donc pas entendre la transmission en cours et se rendorment. C'est pourquoi, dans S-MAC et T-MAC la diffusion de données est limitée à quelques sauts.

- **Norme IEEE 802.15.4 pour les RCSFs** : IEEE 802.15.4 est un standard à faible débit et à faible puissance pour les réseaux personnels (PAN pour *Personal Area Networks*). Un PAN est formé d'un PAN coordinateur qui gère l'ensemble du réseau et, éventuellement, d'un ou plusieurs coordinateurs qui gèrent les sous-ensembles des nœuds du réseau. D'autres nœuds (ordinaires) doivent s'associer à un coordinateur afin de communiquer. Les topologies de réseau possibles sont l'étoile (saut unique), le cluster-tree et le *mesh* (multi-sauts). Le standard *IEEE 802.15.4* [68] prend en charge deux méthodes d'accès aux différents canaux : un mode *beacon-enabled* et un mode *non-beacon enabled*. Le mode *beacon-enabled* fournit un mécanisme de gestion d'énergie sur la base du *duty-cycle*[67]. Concrètement, il utilise une structure de supertrame qui est délimitée par des balises. D'autres trames de synchronisation sont générées périodiquement par les nœuds coordinateurs. Chaque supertrame consiste en une période active et une période inactive. Dans la période d'activité les dispositifs communiquent avec le coordonnateur auquel ils sont associés. La période active peut être divisée en une période d'accès avec contention (CAP pour *Contention Access Period*) et une période sans contention (CFP). Au cours de la CAP un algorithme CSMA/CA discrétisé est utilisé pour accéder au canal, tandis que, durant la CFP, un certain nombre de slots garantis (GTS) peuvent être attribués à chaque nœud. Au cours de la période inactive les dispositifs entrent en mode faible puissance pour économiser l'énergie. Dans le mode *non-beacon enabled*, il n'y a pas de structurée supertrame, i.e. les nœuds sont toujours à l'état actif et utilisent l'algorithme *Unslotted CSMA/CA* pour l'accès au canal et la transmission de données. Dans ce cas, la conservation d'énergie a lieu au niveau des couches supérieures.

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

Exemple : Z-MAC

Z-MAC [64] est l'un des protocoles les plus intéressants. Afin de définir le schéma principal du contrôle de transmission, Z-MAC commence par une phase préliminaire de configuration. Chaque nœud construit une liste de voisins à deux sauts par le biais du processus de découverte de voisins. Puis, un algorithme distribué d'attribution des slots est appliqué pour faire en sorte que deux nœuds dans un voisinage à deux sauts ne soient pas affectés au même slot. Par conséquent, on est assuré qu'une transmission d'un nœud avec à un de ses voisins, à un saut n'interfère pas avec la transmission de ses voisins à deux sauts.

Z-MAC permet à chaque nœud de maintenir son propre ordonnancement qui dépend du nombre de voisins et évite tout conflit avec ses voisins de contention. Chaque nœud a des informations sur les slots de tous ses voisins à deux sauts et tout le monde se synchronise sur un slot de référence. Après cette phase d'initialisation, les nœuds sont prêts pour l'accès au canal. Les nœuds peuvent être soit en mode faible niveau de contention (LCL pour *Low Contention Level*), soit en mode haut niveau de contention (HCL pour *High Contention Level*). Un nœud persiste dans le mode LCL sauf s'il a reçu une notification (ECN pour *Explicit Contention Notification*). Dans le mode HCL, seuls les propriétaires du slot et leurs voisins à deux sauts sont autorisés à concourir pour l'accès au canal. En LCL à la fois les propriétaires et les non-propriétaires peuvent concourir pour transmettre dans n'importe lequel des slots. En revanche les propriétaires ont une priorité sur les autres. De cette façon, Z-MAC peut atteindre un niveau élevé d'utilisation du canal, même en faible contention, car un nœud peut transmettre dès que le canal est disponible.

3.5 Conclusion

De nombreux algorithmes, et protocoles ont été proposés dans la littérature pour traiter les problématiques de la minimisation de l'énergie dissipée par les capteurs et la maximisation de la durée de vie du réseau.

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques approches de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, basés sur la technique de *duty cycling* qui vise à réduire le *duty-cycle* des nœuds. Cela se traduit par la réduction de la durée de l'activité radio afin d'éviter toute surconsommation d'énergie due à la communication. Dans cette optique, plusieurs méthodes ont vu le jour soit sous forme de protocoles MAC à faible *duty-cycle* ou bien sous forme de protocoles indépendants de niveau supérieur fondés sur des ordonnancements *sleep/wakeup*.

La prochaine phase de notre travail consiste justement à présenter notre solution. Dans cette solution nous allons jumeler de nombreux mécanismes que nous avons cités dans cet état de l'art.

CHAPITRE 4

APPROCHE D'OPTIMISATION D'ÉNERGIE DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS

4.1 Introduction

Un réseau de capteur est un ensemble de nœuds capteurs déployés généralement dans des zones difficilement accessible pour prélever des mesures physiques telles que : la température, la pression, etc. Ces grandeurs physiques sont envoyées à la station de base et acheminés par celle-ci à l'utilisateur final via un autre réseau de communication. La problématique fréquemment posée dans un réseau de capteur est bien l'énergie. En effet, les capteurs sont alimentés par des ressources d'énergie limitée (batterie) généralement irremplaçable, de ce fait un noeud utilise son énergie d'une manière optimale pour prolonger sa durée de vie le plus longtemps possible. En général, la portion la plus importante de l'énergie d'un noeud est consommée dans les activités de transmission (émission/réception).

Les solutions proposées dans la littérature et qui se focalisent sur la question d'énergie dans les réseaux de capteurs sont multiples. La plupart de ces solutions se concentrent sur la couche MAC pour minimiser les collisions, l'écoute à un canal libre et les transitions entre les deux modes actif et passif. Dans notre travail, nous avons combiné la technique d'agrégation des données et le principe des noeuds actifs/passifs pour préserver l'énergie des noeuds capteurs et prolonger la durée de vie du réseau en conséquence. Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter le modèle du réseau dans lequel notre solution est opérationnelle, ensuite, nous détaillons notre proposition et analysons les résultats de simulation.

4.2 Modèle du réseau

Le réseau considéré est composé d'un certain nombre de noeuds capteurs déployés aléatoirement dans une zone de capture, et une station de base qui recevra des données capturées pour les acheminer ensuite à l'utilisateur final via un réseau filaire. Les noeuds capteurs sont organisés sous forme de cluster et chaque cluster est orchestré par un cluster head. Initialement, un nombre restreint de noeuds sont actifs dans un cluster donné et les autres sont passifs. Aussi, parmi les noeuds capteurs, on désigne un noeud agrégateur qui reçoit les données des autres noeuds capteurs, les agrège pour les envoyer ensuite au cluster head.

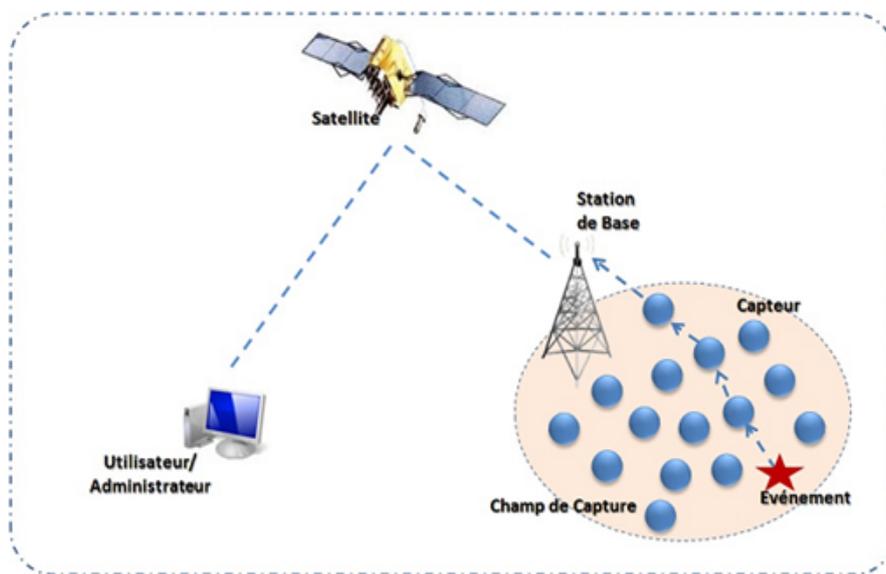


FIGURE 4.1 – Modèle du réseau.

4.3 Solution proposée

Notre but est la conservation de l'énergie des noeuds capteurs pour prolonger la durée de vie du réseau. Pour cela, nous avons conçu une solution qui se base sur le principe des noeuds actifs/passifs combiné avec la technique d'agrégation données. Dans un premier temps, nous allons présenter les hypothèses sous lesquelles notre solution est fonctionnelle, ensuite, nous détaillons notre proposition.

4.3.1 Hypothèses

Nous supposons que l'architecture de notre réseau est hiérarchique, i.e., les noeuds sont organisés sous forme de cluster, et chaque cluster a un cluster head (Chef du cluster), qui com-

munique les données reçues à la station de base. Nous considérons que les noeuds capteurs sont homogènes, i.e., ils ont initialement les mêmes capacités énergétique, de calcul et de stockage.

4.3.2 Détail de la solution proposée

Notre solution se base sur le principe des noeuds actifs et passifs. Un noeud actif est celui qui pourra recevoir et émettre les données, par contre un noeud passif, il est en écoute des paquets et il n'exerce aucune activités d'émission ou de réception. Pour expliquer le fonctionnement de notre solution, nous considérons un seul cluster, qui contient un certain nombre de noeuds. Parmi ces derniers, il y a ceux qui sont actifs et ceux qui sont passifs. L'état passif ou actif d'un noeud capteur est décidé par le cluster head, ce dernier sélectionne les noeuds actifs de telle sorte qu'il maintient la connectivité dans le cluster. Aussi, le cluster head désigne parmi les noeuds actifs un noeud agrégateur. A ce niveau, deux questions peuvent être posées. La première question est comment choisir les noeuds actifs et la deuxième question est comment désigner le noeud agrégateur parmi les noeuds actifs choisis.

En réponse à la première question, les noeuds actifs sont choisis par le cluster head de telle sorte que la connectivité au sein du cluster soit assurée. Une fois choisis, parmi les noeuds actifs, celui qui possède le grand rapport entre l'énergie résiduelle et la distance entre lui et le cluster head est désigné comme un noeud agrégateur, i.e., le cluster head calcule le rapport λ .

$$\lambda = E_{\text{résiduel}} / d_{\text{toCH}} \quad (4.1)$$

Pour chacun des noeuds actifs et sélectionne le noeud actif qui correspond à la valeur maximale de λ et il le désigne comme un noeud agrégateur. A rappeler que l'agrégation consiste à calculer une valeur unique à partir de plusieurs valeurs, il s'agit de calculer la moyenne, la somme, le produit, etc. de plusieurs valeurs pour obtenir une seule valeur représentative. Donc, le noeud agrégateur est responsable d'agréger les données reçues et envoyer le résultat au cluster head. De cette façon, l'énergie est considérablement préservée. La Figure 4.1 Schématise notre solution.

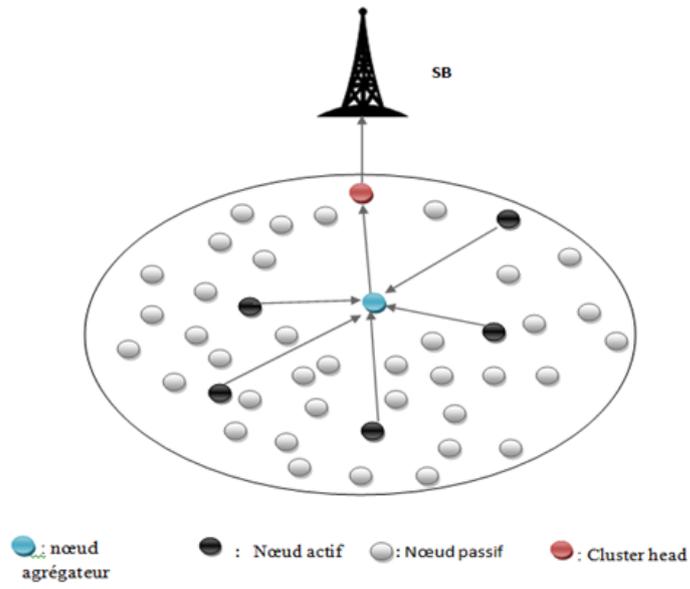


FIGURE 4.2 – schéma générale de notre proposition.

L'algorithme Agregateur() montre le processus pour sélectionner un nœud agrégateur parmi ceux qui sont actifs.

Algorithme 1 :

```

Début
    max ← 0; agr ← 1 ;
    N : nombre des nœuds; i: identificateur des nœuds ;
    Pour i=1 à N faire
         $d_{chi} = \sqrt{(xch - xi)^2 + (ych - yi)^2}$  ;
         $\lambda_i = \frac{E_{ri}}{d_{chi}}$  ;
        Si ( $\lambda_i > \text{Max}$ ) alors
            agr ← i ;
            max ←  $\lambda_i$  ;
        Finsi ;
    Finpour ;
    Retourne (agr);
Fin.
    
```

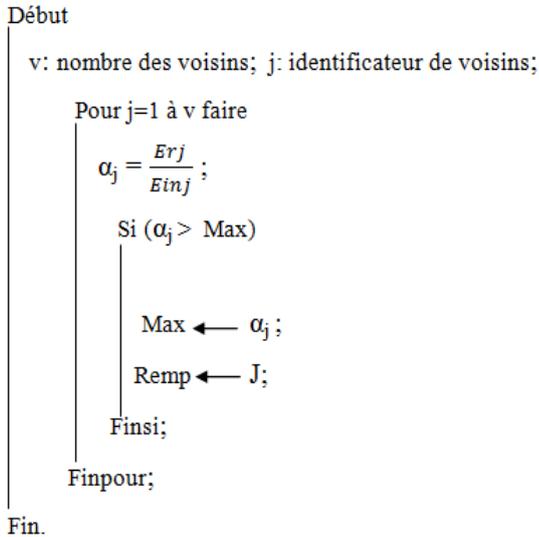
Un nœud actif, quand il épuise son énergie, il sélectionne un remplaçant parmi ses voisins passifs. Le choix du remplaçant se fait en calculant α qui représente le rapport entre l'énergie résiduelle et l'énergie initiale.

$$\alpha = E_{\text{résiduel}} / E_{\text{initial}} \tag{4.2}$$

Le nœud qui correspond à la plus grande valeur de α remplacera le nœud actif qui s'apprête à quitter le réseau. De cette façon, la connectivité du réseau reste toujours assurée. Bien évidemment, le cluster head est tenu informé de ce remplacement. L'algorithme Remplacent () montre le processus pour choisir un remplaçant parmi les voisins.

Algorithme 2 :

Algorithme Remplacent ;



Dans notre solution, l'énergie est conservée dans deux aspects qui sont : l'agrégation des données et le fait qu'un nombre restreint de nœuds sont actifs. En effet, en utilisant l'agrégation des données, le nombre de paquets à envoyer est considérablement diminué, ce qui minimise en conséquence l'énergie consommée. Considérer un nombre restreint de nœuds actifs sauvegarde aussi l'énergie des autres nœuds qui sont passifs. Ceci augmentera significativement la durée de vie du réseau.

4.4 Simulation

Pour valider notre proposition, nous avons effectué une série de simulation avec MATLAB 7.9.0(R2009b). Dans ce qui suit, nous allons énumérer les paramètres de simulation et citer les différentes métriques mesurées, ensuite, nous allons analyser et discuter les résultats de simulation.

4.4.1 Paramètres de simulation

Le Tableau 4.1 regroupe les différent paramètres utilisés dans la simulation.

4.4.2 Métriques de simulation

Afin de montrer l'efficacité de notre solution, nous avons considéré les métriques suivantes :

1. Energie moyen restante : représente la quantité d'énergie consommée par l'ensemble des nœuds dans le réseau. Cette métrique est mesurée dans le cas normal sans solution et

Paramètre de simulation	Valeurs
Surface (m ²)	100*100
Nombre de nœuds	100
Taille paquet	6400
Energie initiale (joules)	0.5
Energie d'émission (watt)	50*0.000000001
Energie de réception (watt)	50*0.000000001
Energie d'agrégation (watt)	5*0.000000001
Temps de simulation (Minute)	15000
Portée des capteurs (Mètres)	20

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

dans le cas d'utilisation de la solution.

2. Nombre de Paquet : représente le nombre de paquets envoyés au cluster head dans les deux cas avec et sans agrégation.
2. Durée de vie : représente la durée de vie du réseau. Cette métrique est mesurée dans le cas normal sans solution et dans le cas où la solution est utilisée.

4.4.3 Résultats de simulation

Les nœuds sont déployés d'une manière aléatoire sur une interface de (100x100) m², la Figure 4.2 illustre des différents nœuds dans le réseau.

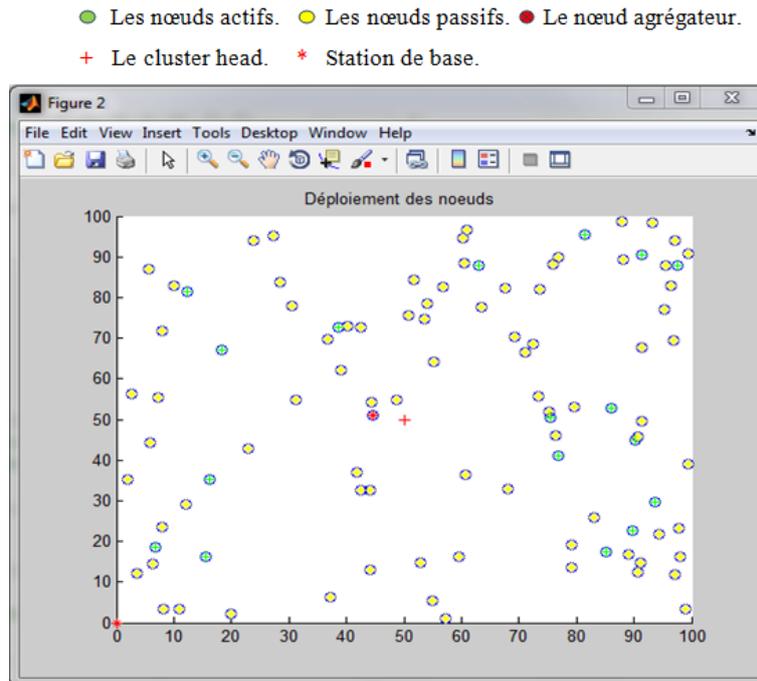


FIGURE 4.3 – Déploiement des capteurs dans le réseau.

4.4.3.1 L'énergie moyenne restante

Sur la Figure 4.3 on remarque que l'énergie moyenne restante dans le réseau normale est brusquement diminuée, après la réalisation de 1474 min les nœuds consomme 99.8% de l'énergie moyenne du réseau, et en remarque l'épuisement total de l'énergie après 1474 min, par contre dans notre protocole, quand le temps de la simulation inferieur 5086 min, les nœuds consomme juste 23.5% d'énergie moyenne du réseau, et quand le temps supérieur ou égale à 5086 min, il n'y a aucun épuisement d'énergie, Cette amélioration peut être justifiée par le mécanisme appliqué par notre protocole le principe des nœuds passifs/actifs et l'agrégation des données.

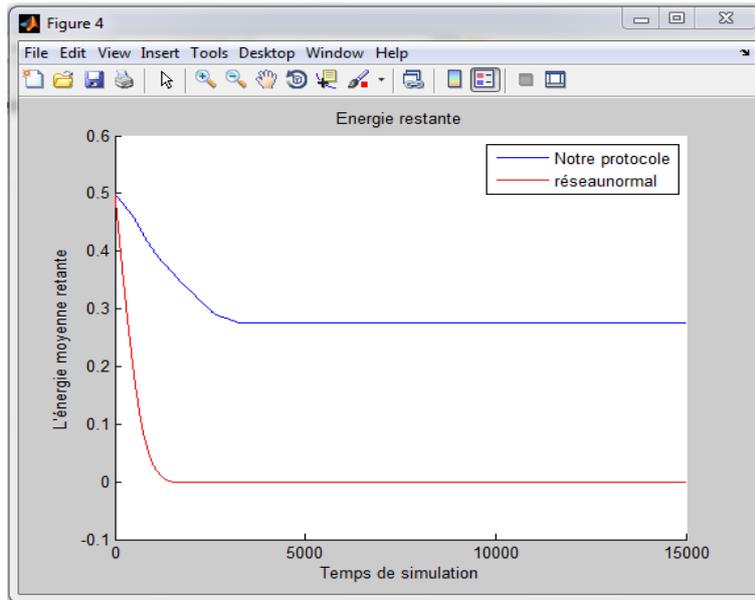


FIGURE 4.4 – L'énergie moyenne restante.

4.4.3.2 La durée de vie du réseau

Pour pouvoir étudier la durée de vie du réseau en fonction du temps de simulation, nous avons suivi l'évolution de 100 nœuds capteurs dans le temps. La Figure 4.4 présente le nombre des nœuds mort dans le réseau en fonction du temps afin d'examiner l'efficacité de notre protocole par rapport au protocole du réseau normal.

Il est clair, que la durée de vie du réseau de notre protocole surpasse celle du protocole réseau normale, on remarque que notre protocole, a bénéficié presque 50% par rapport à l'autre protocole, ce gain est grâce à ce que certains nœuds sont actifs au départ puis quand un nœud épuise leurs énergie il va choisir un de ses voisins passifs pour revenir à l'état actif. Ce qui nous permet de augmenter la durée de vie de réseau entier.

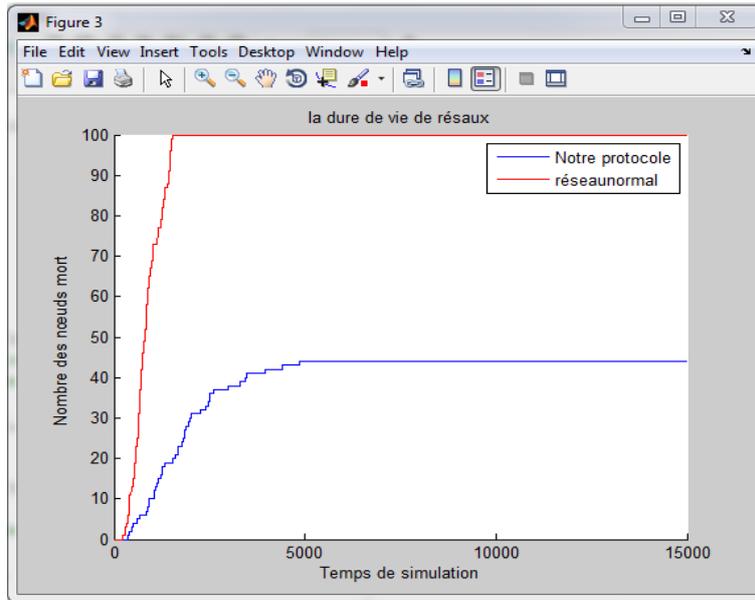


FIGURE 4.5 – La durée de vie du réseau.

4.4.3.3 Nombre de paquets

Sur la Figure 4.5, on peut voir que le nombre des paquets envoyer par le réseau normal est plus grand par rapport à notre protocole. Cette différence peut être justifier par le principe utilisé dans notre protocole : que certains nœuds actifs doivent transmettre des paquets et les autres nœuds restent à l'état passif et aussi le nœud agrégateur qui agréger les données reçues et envoyer le résultat au cluster head , par contre dans le réseau normal tous les nœuds sont à l'état actifs et transmettre directement les paquets.

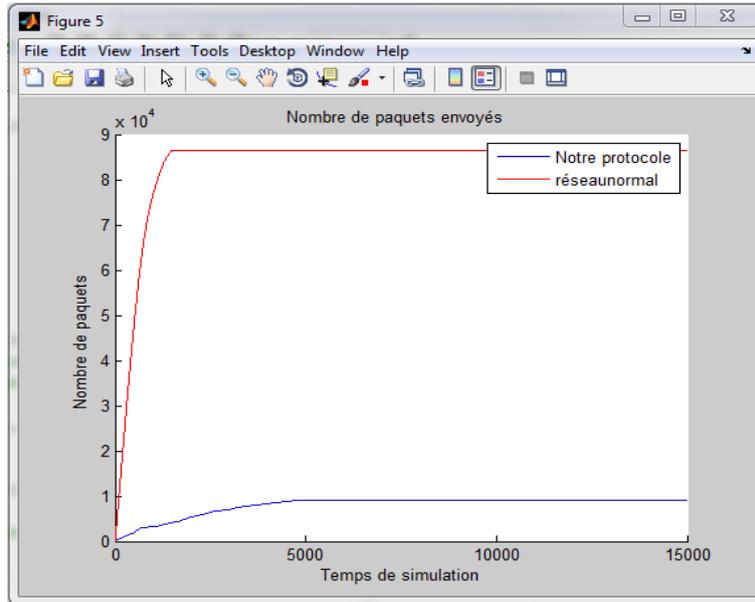


FIGURE 4.6 – Nombre de paquets.

4.5 Conclusion

Plusieurs protocoles ont été développés pour minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans ce chapitre nous avons présenté une description détaillée d'un nouveau protocole qui se base sur le principe des nœuds actifs/passifs et utilise la technique d'agrégation des données pour minimiser la consommation d'énergie et augmenter la durée de vie de réseau.

D'après les résultats de simulation, on conclue que notre protocole réduit l'énergie consommée au niveau des nœuds capteurs et augmente la durée de vie du réseau entier.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à la problématique de la conservation de l'énergie dans un réseau de capteurs. Dans ce dernier, les noeuds capteurs sont alimentés par des batteries à faible capacité, généralement irremplaçables car les noeuds capteurs sont déployés dans des zones difficilement accessibles. Afin de prolonger la durée de vie du réseau de capteurs en minimisant la consommation d'énergie, plusieurs solutions ont été proposées. La majorité de ces solutions essaient d'éviter les différentes causes de perte d'énergie. Généralement, ces solutions ne sont pas suffisamment optimales ce qui laisse l'énergie dans un réseau de capteur un problème de recherche ouvert.

Notre contribution dans ce mémoire consiste à proposer une solution qui se base sur le principe des noeuds actifs/passifs et utilise la technique d'agrégation des données pour minimiser la consommation d'énergie dans le réseau. Son idée clé est qu'un nombre restreint de noeuds dans un cluster sont actifs. Un noeud agrégateur est choisi parmi ces noeuds actifs pour collecter les données envoyées par les autres noeuds actifs, les agréger et les envoyer au cluster head. L'utilisation de la technique d'agrégation des données minimise considérablement le nombre de messages envoyés et conserve en conséquence l'énergie du réseau. Le fait qu'un nombre restreint de noeuds sont actifs à un moment donné, préserve l'énergie des autres noeuds qui sont passifs et augmente davantage la durée de vie du réseau. Les résultats de simulation montrent que notre solution est efficace en termes de consommation d'énergie et prolonge le plus longtemps possible la durée de vie du réseau.

Notre solution fait appel à des opérations consommatrices d'énergie telles que le choix du noeud agrégateur et le remplacement des noeuds actifs par des noeuds passifs. Dans un travail futur, nous envisageons d'optimiser ces opérations pour minimiser davantage la consommation

d'énergie dans le réseau. Nous allons aussi comparer les performances de notre solution avec des travaux de référence pour bien évaluer l'efficacité et la robustesse de notre solution.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Y. Sankarasubramaniam I-F. Akyildiz, W. Su and E.Cayirci. "*A Survey on Suncor Networks*". *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, pp.102-114, 2002.
- [2] Y. Sankarasubramaniam I-F. Akyildiz, W. Su and E. Cayirci. "*Wireless Sensor Networks : a Survey*". *Computer Networks : The Intrnational Journal of Computer and elecommuni-cations Networking*, pp.393-422, 2002.
- [3] D. Estrin D. Culler and M. Srivastava. "*Overview of Sensor Networks*". *IEEE Compu-ter*, Vol.37, pp.41-49, 2004.
- [4] B. Krishnamachari. "*Networking Wireless Sensor*". *Combridage University Press*, 2006.
- [5] K. Holger and A. Willig. "*Protocols and Architecteures for Wireless Sensor Networks*". *Jhon Wiley and Sons Ltd*, 2005.
- [6] I-F. Akyildiz and M-C. Vuran. "*Wireless Sensor Networks*". *Published by Jhon Wiley Sons*, 2010.
- [7] J. Al-Karaki and A-E. Kamal. "*Routing techniques in Wireless Sensor networks : a Sur-vey*". *IEEE Wireless Communications*, Vol.11, pp.6-28, 2004.
- [8] H. Karl and A. Willig. "*A short Survey of Wireless Sensor Networks*". *Technical Reparts*, 2003.
- [9] Y-W. Hong A. Swami, Q. Zhao and L. Tong. "*Wireless Sensor networks Signal Processing and Communication*". *Edition Jhon Wiley Sons*, 2002.
- [10] N. Mitton E. Chavez and H. Tejada. "*Routing in for Wireless Networks with Position Trees*". *In Pcedeengs of the 6th International Conference on Ad hoc networks and wireless pp.32-47*, 2007.

- [11] K. Yang. *"A Study on Power-Friendly Routing Protocols for Sensor Networks"*. Technical Report, University of Essex Department of Electronic Systems Engineering, 2005.
- [12] S. Park V. Raghunathan, C. Schurgers and M-B. Srivastava. *"Energy-Aware Wireless Microsensor Networks"*. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol.19, pp.40-50, 2002.
- [13] D-C. Silva M-A-M. Vieira, C-N. Coelho and J-M. Mata. *"Survey on Wireless Sensor Network Devices"*. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp.537-544, 2003.
- [14] R. Adouane. *"Optimisation de la Consommation d'Energie dans les Réseaux de Capteurs"*. *Mémoire fin d'étude faculté des sciences exacte*, pp7-8, 2009.
- [15] N. Ickes E. Shih, S-H. Cho and R. Min. *"Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks"*. In *Proceedings of the ACM MO-MICOM Conference*, pp.272-286, 2001.
- [16] E. Yoneki and J. Bacon. *"A survey of Wireless Sensor Network Technologies : research trends and middleware's role"*. *Technical Reports, University of Cambridge*, 2005.
- [17] A. Bunel. *"Les réseaux de capteurs sans fil"*. <http://www.igm.univ/lv.fr/drXPOSE2006/Bunel/Routagmai>, 2011.
- [18] A. Chandrakasan W. Heinzelman and H. Balakrishnan. *"Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks"*. In *Proceedings of the International Conference on System Sciences*, 2000.
- [19] L. Khelladi and N. Badache. *"Les réseaux de capteurs : état de l'art"*. *Rapport de recherche, faculté électronique et informatique Bab Ezzouar-Algérie*, 2004.
- [20] C. Castelluccia and A. Francellon. *"Protéger les réseaux de capteurs sans fil"*. In *Proceedings Symposium sur la sécurité des technologies de l'information et des communications*, 2008.
- [21] A. Pandey and R-C. Tripathi. *"A Survey on Wireless Sensor Networks Security"*. *International Journal of Computer Applications*, Vol.3, pp.43-49, 2010.
- [22] *"http://www.tinyos.net, mai"*. 2011.
- [23] A. Woo S. Hullar-D. Culler J. Hill, R. Szewczyk and K. Pister. *"System Architecture Directions for Networked Sensor"*. In *Proceedings of International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, pp.93-104, 2000.

- [24] D. Gay P. Levis and D. Culler. *"Programming Sensor Networks with Application Specific Virtual machines"*. Technical Report, University of California, Berkeley, 2004.
- [25] N. Tazerart L. Bakli. *"Etude et amélioration d'un protocole de routage efficace en énergie dans les réseaux de capteurs"*. Mémoire fin d'étude faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur, pp.11, 2011.
- [26] <http://robotics.eecs.berkeley.edu/pister/SmartDust/SmartDustResearchProjectHomepage>.
- [27] [http://robots.stanford.edu/SebastienThrun's Home page.htm](http://robots.stanford.edu/SebastienThrun's%20Home%20page.htm).
- [28] <http://robotics.usc.edu/behari/SKIT.html> Sub-Kilogram Intelligent TeleRobots Home page.
- [29] Q. Zhao and L. Tong. *"Distributed opportunistic transmission for Wireless Sensor Network"*. Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2004), vol.3, mai, 2004.
- [30] <http://www.xbow.com/Products/WirelessSensor-Networks>.
- [31] Yi Yang V. Rajaravivarma and Teng Yang. *"An overview of Wireless Sensor Network and Applications"*. In the 35th Southeastern Symposium on, pp.432-436, march, 2003.
- [32] Z. Wang R. Lin and Y. Sun. *"Wireless Sensor Networks Solutions for Real Time Monitoring of Nuclear Power Plant"*. In Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automatio, 2004.
- [33] O. Samira. *"La couche mac avec contraintes d'énergie et d'équité dans les réseaux de capteurs"*. Master's thesis, Mémoire de Magistère En Informatique Option : Réseaux et Systèm-es Distribués de l'Université de Bejaia, Algérie, 2006.
- [34] A. Assia. *"Mac Protocol Design Based on Satellites Presence in Wireless Sensor Networks"*. Master's thesis, Mémoire de Magistère En Informatique, école Doctorale Réseaux et Systèmes Distribués de l'Université de Bejaia, Algérie, 2007.
- [35] W-B. Heinzelman J. Deng, Y-S. Han and P-K. Varshney. *"Scheduling Sleeping Nodes in High Density Cluster-based Sensor Networks"*. Mobile Networks and Applications, vol.10, pp.825-835, 2005.
- [36] P. Havinga-L-V. Hoesel T. Nieberg, S. Dulman and J. Wu. *"Collaborative Algorithms for Communication in Wireless Sensor Networks"*. Ambient Intelligence : Impact on Embedded Systems, Kluwer Academic Publishers, Octobre, 2003.

- [37] M-E. KHANOUCHE. *"Le traitement du problème de la couverture dans les réseaux de capteurs sans fil"*. Thèse, faculté des Sciences Exactes universités A.MIRA-BEJAIA, 2008.
- [38] A. Nadi S. Bouzid. *"Le routage sous contrainte d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil"*. Thèse, faculté des Sciences Exactes universités A.MIRA-BEJAIA, 2012.
- [39] K. Sohrabi and G-J. Pottie. *"Performance of a Novel Self-Organization Protocol for Wireless Ad-hoc Sensor Network"*. In *Proceedings of the 50th IEEE Vehicular Technology Conferebce*, pp.1222-1226, 1999.
- [40] M.Ilyas and I. Mahgoub. *"Handbook Of Sensor Networks : Compact Wireless And Wired Sensing Systems"*. CRC press, 2005.
- [41] F. Sivirikaya and B. Yener. *"Time Synchronization In Sensor Networks : A Survey"*. *IEEE Network Journal*, Vol.18, pp.45-50, 2004.
- [42] V-S. Raghavan S. Kumar and J. Deng. *"Medium Access Control Protocols for Ad-hoc Wireless Networks : A Survey"*. *Elsevier Ad-hoc Networks Journal*, Vol.4, pp.326-358, 2006.
- [43] P. Santi. *"Topology control in wireless Ad hoc and Sensor Networks"*. Hard-cover, July, 2005.
- [44] S. Rath B-P-S. Sahoo and D. Puthal. *"Energy Efficient Protocols for Wireless Sensor Networks : A Survey and approach"*. *International Journal of Computer Applications*, Vol.44, pp.43-48, 2012.
- [45] P. Patil J-N. Dehankar and G. Agarwal. *"Survey on Energy Consumption in Wireless Sensor Network"*. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, Vol.2, pp.1-4, 2013.
- [46] B. Baranidharan and B. Shanthi. *"A Survey on Energy Efficient Protocols for Wireless Sensor Networks"*. *International Journal of Computer Applications*, Vol.11, pp.35-40, 2010.
- [47] K. Holger and A. Willig. *"Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks"*. *Jhon Wiley and Sons Ltd*, 2005.
- [48] J-H. Chang and L. Tassiulas. *"Energy Conceriving routing in Wireless Ad-hoc Network"*. In *Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Coputer and Commnications Societies*, pp.22-31, 2000.

- [49] A. Giridhar and P-R. Kumar. "Maximizing the Functional Lifetime of Sensor Networks". In *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, pp.5-12, 2005.
- [50] D. Kofman-R. Mazumdar V-P. Mahatre, C. Rosenberg and N. Shroff. "A Minimum Cost Heterogeneous Sensor Network with a Lifetime Constraint". *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.4, pp.4-15, 2005.
- [51] V. Srinivasan W. Wang and K-C. Chua. "Using Mobile Relays to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks". In *Proceedings of the 11th Annual international conference on Mobile Computing and Networking*, pp.270-283, 2005.
- [52] A. Cerpa and D. Estrin. "ASCENT : Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies". *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.3, pp.272-285, 2004.
- [53] W-B. Heinzelman J. Deng, Y-S. Han and P-K. Varshney. "Scheduling Sleeping Nodes in High Density Cluster-based Sensor Networks". *Mobile Networks and Applications*, Vol.10, pp.825-835, 2005.
- [54] K. Helman and M. Colagrosso. "Investigating a Wireless Sensor Network Optimal Lifetime Solution for Linear Topologies". *Journal of Interconnection Networks*, Vol.7, pp.91-99, 2006.
- [55] 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*, pp.32-41, 2002.
- [56] M. Younis K. Arisha, M. Youssef. "Energy-aware TDMA-based MAC for Sensor Networks". In *Proceedings IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communications, Computing and Networking (IMPACCT 2002)*, New York City, USA, May, 2002.
- [57] J. Haartsen. "The Bluetooth Radio System". *IEEE Personal Communications* vol.17, pp.28-36, 2000.
- [58] G. Lazarou J. Li. "A bit-map-assisted Energy-Efficient MAC Scheme for Wireless Sensor Networks". In *Proceedings International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2004)*, Berkeley USA, pp.56-60, April, 2004.
- [59] J-J. Garcia-Luna Aceves V. Rajendran, K. Obraczka. "Energy-efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks". In *Proceedings ACM SenSys 2003*, Los Angeles (USA), November, 2003.

- [60] J. Heidemann W. Ye. "Medium Access Control in Wireless Sensor Networks", in C. Raghavendra, K. Sivalingam, T. Znati (Eds.), "Wireless Sensor Networks". Kluwer Academic Publishers, (Chapter 4), 2004.
- [61] F. Alagoz I. Demirkol, C. Ersoy. "MAC Protocols for Wireless Sensor Networks : a Survey". *IEEE Communications Magazine*, 2006.
- [62] K. Langendoen. "Medium access control in wireless sensor networks", in : H. Wu, Y. Pan (Eds.), "Medium Access Control in Wireless Networks". Practice and Standards, vol. II, Nova Science Publishers, (Book Chapter), 2008.
- [63] K. Sivalingam P. Naik. "A Survey of MAC Protocols for Wireless Sensor Networks", in : C. Raghavendra, K. Sivalingam, T. Znati (Eds.), "Wireless Sensor Networks". Kluwer Academic Publishers. (Chapter 5), 2004.
- [64] M. Aia J. Min I. Rhee, A. Warriar and M-L. Sichitiu. "Z-MAC : a hybrid MAC for wireless sensor networks". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pp.511-524, 2008.
- [65] V. Tsiatsis C. Schurgers and Mani B. Srivastava. "Stem : Topology management for energy Efficient Sensor Networks". In *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, vol.3, pp.78-89, 2002.
- [66] Jennifer C. Hou R. Zheng and L. Sha. "Asynchronous Wakeup for Ad hoc Networks". In *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad Hoc networking and computing (MobiHoc 03)*, New York, NY, USA, ACM, pp.35-45, 2005.
- [67] C. Schurgers D. Mirza, M. Owrang. "Energy-efficient wakeup scheduling for maximizing lifetime of IEEE 802.15.4 Networks". In *Proceedings International Conference on Wireless Internet (WICON 05)*, Budapest, Hungary, pp.130-137, July, 2005.
- [68] Part 15.4 IEEE 802.15.4. "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)".
- [69] T.V. Dam and K. Langendoen. "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks". in : *The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys'03)*, Los Angeles, CA, USA, November, 2003.
- [70] D. Estrin W. Ye, J. Heidemann. "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks". *IEEE/ ACM Transactions on Networking Vol.12*, pp.493-506, 2004.

- [71] D. Culler J. Polastre, J. Hill. "*Versatile Low Power Media Access for Sensor Networks*". in : *Proc. Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp.3-5, November, 2004.
- [72] A. Woo S. Hollar D.E. Culler K.S.J. Pister J. Hill, R. Szewczyk. "*System Architecture Directions for Networked Sensors*". in : *Proc. ASPLOS 2000*, November, 2000.
- [73] H. Balakrishnan W. Heinzelman, A. Chandrakasan. "*Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro Sensor Networks*". In *proc of the Hawaii International Conference on Systems Science*, vol.8, pp.8020, January , 2000.
- [74] C. R. Lin and M. Gerla. "*Adaptive Clustering for Mobile Wireless Networks*". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications Edition*, Vol.15 of No.7, pp.1265-1275, September, 1997.
- [75] R. ZITOUNI. "*Routage à Basse Consommation d'énergie dans les Réseaux de Capteurs sans Fil*". thèse magister ReSyD, Université de Bejaia, 2006.
- [76] S. BOULEFKHAR. "*Approches de Minimisation d'énergie dans les Réseaux de Capteurs*". Thèse Magister ReSyd Béjaia. Algérie, 2006.
- [77] M. Di Francesco A. Passarella G. Anastasi, M. Conti. "*Energy Conservation in Wireless Sensor Networks : A Survey*". *Engineering, University of Pisa, Italy*, pp.541-542, 2009.
- [78] T. Abdelzaher T. He and C. Lu. SPEED J. A. Stankovic. "*A Stateless Protocol for Real Time Communication in Sensor Networks*". *the 23rd international conference on distributed computing systems (icdcs) edition*, pp.46-55, 2003.
- [79] J. B. E. Yoneki. "*A survey of Wireless Sensor Network Technologies : research trends and middleware's role*". *University of cambridge, rapport technique*, 2005.
- [80] C. D. Braginsky et D. Estrin. "*Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks*". *ACM Press New York, NY. the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA) pp.22-31, USA, 2002.*
- [81] C. K. Ton. "*Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in Wireless Ad-hoc Networks*". *IEEE Communications magazine Edition*, Vol.39 of N.6, pp.138-147, Juin , 2001.
- [82] Akkaya and M. Younis. "*A survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks Ad Hoc Networks*". Vol.3, PP.325-349 of N.3, 2005.

- [83] E. Yoneki and J. Bacon. *"A Survey of Wireless Sensor Network Technologies : Research Trends and Middleware's Role"*. Technical Report, Computer Laboratory, UCAMCL-TR-646 ISSN 1476-2986, No.646, Septembre, 2005.

Résumé

Un réseau de capteurs est un ensemble de nœuds déployés dans une zone de capture pour prélever des grandeurs physiques telles que la température, l'humidité, la pression, etc. Les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries généralement irremplaçables et à capacité limitée. Ceci rend l'énergie une ressource critique à conserver pour prolonger la durée de vie du réseau. Dans notre travail, nous avons proposé une solution qui combine le principe des nœuds actifs/passifs et la technique d'agrégation pour préserver l'énergie des capteurs et prolonger la durée de vie du réseau en conséquence. Les résultats de simulation montrent que la solution proposée prolonge davantage la durée de vie du réseau de capteurs.

Mots clés : Réseau de capteurs, Conservation d'énergie, Agrégation des données, nœuds passifs/actifs.

Abstract

A sensor network is a set of nodes deployed in a capture zone for taking physical values such as temperature, humidity, pressure, etc. The sensor nodes are usually powered by irreplaceable batteries with limited capacity. This makes the energy a critical resource to preserve in order to extend the lifetime of the network. In our work, we have proposed an approach that combines the principle of active/passive nodes and the aggregation technique to preserve the energy of sensors and prolong the lifetime of the network consequently. Simulation results show that the proposed approach extends further the lifetime of the sensor network.

Key words : Sensor networks, Energy conservation, Aggregation of the data, Passive/active nodes.