

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de l'ingénierat

Année : 2014/2015

Département d'Informatique

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} Cycle LMD

Intitulé

Prolongation de la Durée de Vie des Batteries dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)

Option : Réseaux et Sécurité Informatique

Par : Bendjeddou Amira

DIRECTEUR DE THESE: Pr. GHOUALMI Nassira Zine

Devant le Jury

PRESIDENT : Tahar Bensebaa

Pr. Université d'Annaba

EXAMINATEURS : Rida Laouar

Pr. Université de Tebessa

Makhlouf Derdour

MCA. Université de Tebessa

Nora Bounour

MCA. Université d'Annaba

A la mémoire de mon père,

A ma très chère mère

Remerciement

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Madame. Nassira GHOUALMI-ZINE, pour, d'une part, les connaissances qu'elle ma transmises, et d'autre part, pour avoir accepté de diriger ce travail de thèse, je tiens aussi à exprimer ma profonde reconnaissance pour ces conseils et orientations.

J'adresse également mes très sincères remerciements à Mr. Tahar BENSEBAA, professeur à l'Université d'Annaba, d'avoir accepté de présider mon jury.

J'exprime ma plus profonde gratitude à Mr. Rida LAOUAR, professeur de l'Université de Tebessa, Mr. Makhlof DERDOUR, maitre de conférences à l'Université de Tebessa et Mme Nora BOUNOUR, maitre de conférence à l'Université d'Annaba, de m'avoir fait l'honneur de rapporté cette thèse, soient assurés de ma reconnaissance pour l'intérêt qu'ils ont apporté à ce travail.

Mes vifs remerciements à l'équipe T2I de LIUPPA-Pau, France en particulier Pr.Congduc PHAM qui m'a accueilli, soutenue, et qui a partagé ses connaissance avec moi. Sans oublier les doctorants : Mamour DIOP et Muhammad EHSAN pour leurs aides précieuses, je les remercie du plus profond de mon cœur.

Je remercie mon adorable tante Amel ainsi que mon professeur Mme LAALOUCHI d'avoir accepté de faire une relecture de ce manuscrit.

Merci à mes amis, mes collègues et toute personne qui a contribué à la réalisation de ce travail.

Je dois une mention particulière à ma famille qui m'a toujours soutenue et a été toujours présente pour moi en particulier ma maman, merci maman.

الملخص

الابحاث المقدمة في هذه الأطروحة تمت في سياق شبكات أجهزة الاستشعار المتحركة والثابتة. هذه الابحاث تدرس واحدة من أهم القضايا التي تواجه هذا النوع من الشبكات وهي الحفاظ على الطاقة.

بنسبة لشبكات الاستشعار المتحركة، اقترحنا أولاً خوارزمية للحفاظ على الطاقة والرابط بين أجهزة الاستشعار و تعتمد على نظام التحكم في بث الطاقة، وهو يتمثل في التكيف الذاتي لبث الطاقة لكل جهاز استشعار وفقاً للجيران المتواجدين على بعد قفزين.

وتكرس المساهمة الثانية لشبكات الاستشعار المتحركة بتحديد شبكة زيرانات وبالتالي اقتراح طريقتين احتماليين اللتان تهدفان إلى التقليل من الطاقة المستهلكة ومتوسط التأخير. كلتا الطريقتين تقومان بفحص دوري لمستوى البطارية المتبقي إذا كان أقل من عتبة محددة مسبقاً. العدة تتغير من وضع الكشف إلى وضع التتابع. الطريقتان تختلفان في طرقهم لتحديد العتبة. الطريقة الأولى تحسب عتبة ثابتة لجميع العقد في الشبكة باستخدام القانون بواسون. في حين أن الثانية تحسب عتبة لكل عقدة استناداً إلى ملاحظات علماء البيولوجيا.

المساهمة الأخيرة من هذه الأطروحة تتعامل مع شبكات أجهزة الاستشعار الثابتة. نود تمديد عمر الشبكة وضمان الربط السليم بين عقد الاستشعار. كالمساهمة الأولى تستند المساهمة الأخيرة على نظام التحكم في بث الطاقة. والفكرة هي أن كل عقدة تضبط بث الطاقة من خلال الاعتماد على المعلومات الواردة في جوارها.

الكلمات الرئيسية

شبكات الاستشعار، الحركة، الحفاظ على الطاقة، الرابط، التأخير، التحكم في بث الطاقة.

Abstract

This thesis tackles the problem of energy preservation in both mobile and static wireless sensor networks.

First, we provide a distributed power control scheme designed for mobile wireless sensor network. It aims to reduce the energy spent at communication and ensuring a good connectivity. This is realized by adapting the transmission power of each mobile node according to the two-hop neighbors.

Secondly, we present two probabilistic methods to reduce the energy consumption and at the same time improve the latency in mobile wireless sensor network surveillance applications, based ZebraNet. The main idea of these methods is: each sensor node periodically, checks its remaining battery. If this latter is less than a calculated threshold, the node will change its state from detection to relaying mode. The first method defines a fixed threshold for all nodes, which is calculated using Poisson distribution. Whereas, the second method uses a variant threshold for each node based on biologist observations.

The last contribution of this thesis is devoted to the static networks. We proposed a Distributed transmission Power Control Method to minimize the consumed energy is proposed. Moreover, it aims to keep a good connectivity between nodes. These purposes are accomplished by adjusting, dynamically, the transmission power taking into account the connectivity information of the neighbors at one and two-hop.

Keywords

Wireless Sensor Networks, Mobility, Energy Preservation, Connectivity, Latency, ZebraNet, Power Control.

Résumé

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre des réseaux de capteurs mobiles et statiques. Ils traitent l'une des plus importantes problématiques rencontrées par ce type de réseaux, à savoir la conservation d'énergie.

Pour les réseaux de capteurs mobiles, Nous avons tout d'abord proposé un algorithme de conservation d'énergie et de maintien de connectivité basé sur la technique de contrôle de puissance. Il consiste en l'auto-adaptation de la puissance de transmission pour chaque nœud mobile en fonction des voisins à deux sauts. La deuxième contribution pour les réseaux de capteurs mobiles est dédiée au réseau Zebranet d'où la proposition de deux méthodes probabilistes ayant pour but la minimisation de l'énergie consommée et le retard moyen de bout en bout. Ces deux méthodes vérifient périodiquement le restant de la batterie, si ce dernier est inférieur à un seuil pré-calculé, le nœud change son état du mode détection au mode relais. Elles se diffèrent dans leurs manières de définir le seuil. La première méthode calcule un seuil fixe pour tous les nœuds du réseau en utilisant la loi de poisson. Tandis que la deuxième calcule un seuil variant pour chaque nœud basé sur les observations des biologistes.

La dernière contribution de cette thèse concerne les réseaux de capteurs statiques. L'objectif est double, nous souhaitons prolonger la durée de vie du réseau et assurer une bonne connectivité entre les nœuds capteurs. Tout comme la première contribution, la dernière contribution est basé sur le contrôle de puissance. L'idée est que chaque nœud adapte sa puissance de transmission en se reposant sur les informations de son voisinage à un et à deux sauts.

Mots clés

Réseaux de capteurs, Mobilité, Conservation d'énergie, Connectivité, Latence, Zebranet, Contrôle de puissance.

Table des matières

المخلص	i
Abstract	ii
Résumé	iii
Table des matières	iv
Table des figures	x
Liste des tableaux	xii
Table des acronymes	xiii
Introduction générale	1
1. Contexte général du travail et problématique.....	1
2. Objectifs de la thèse	2
3. Principales contributions de la thèse	2
4. Organisation de la thèse.....	4
1. Les réseaux de capteurs : définitions et concepts de base	6
1.1 Introduction.....	6
1.2 Définitions	7
1.2.1 Un capteur	7
1.2.2 Un capteur intelligent	7
1.3 Architecture matérielle d'un nœud de capteur	8
1.4 Architecture logicielle d'un nœud capteur (la Pile protocolaire).....	10
1.5 Architecture de communication d'un réseau de capteurs.....	11
1.6 Les domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil.....	12
1.7 Classification des réseaux de capteurs sans fil.....	17
1.7.1 Selon le type d'application	17
1.7.2 Selon le mode de communication.....	18

1.7.3 Selon la mobilité	20
1.7.4 Selon la capacité des nœuds dans le réseau.....	20
1.8 Systèmes d'exploitation et protocole de communication pour capteurs.....	20
1.8.1 TinyOS.....	21
1.8.2 Contiki et Rime.....	22
1.8.3 MANTIS OS.....	22
1.8.4 SOS	23
1.8.5 ZigBee.....	23
1.9 Contraintes des réseaux de capteurs	24
1.9.1 La Consommation énergétique	24
1.9.2 La couverture.....	25
1.9.3 La connectivité.....	26
1.9.4 La tolérance aux pannes.....	26
1.9.5 Le passage à l'échelle (l'extensibilité)	27
1.9.6 La topologie dynamique.....	27
1.9.7 La bande passante limitée	27
1.9.8 Agrégation de données.....	28
1.11 Comparaison entre les réseaux Ad hoc classiques et les réseaux de capteurs.....	28
1.12 Conclusion	30
2. Les réseaux de capteurs mobiles	31
2.1 Introduction	31
2.2 Les problèmes rencontrés par les réseaux de capteurs statiques.....	32
2.3 Architectures des réseaux de capteurs mobiles.....	33
2.4 Les différents rôles des nœuds dans un réseau de capteurs mobiles.....	35

2.5 Modèles de mobilité pour les réseaux sans fil mobile.....	36
2.5.1 Le modèle de point de cheminement aléatoire (Random Waypoint).....	37
2.5.2 Modèle de mobilité marche/ direction aléatoire (Random Walk/ Random Direction).....	38
2.5.3 Modèle de mobilité Manathan.....	39
2.5.4 Le modèle Gauss-Markov.....	39
2.5.5 Le Modèle d'autoroute (FreeWay- FW).....	40
2.5.6 Modèle de mobilité de point de référence (RPGM).....	41
2.5.7 Modèle de mobilité de la colonne.....	42
2.5.8 Modèle de mobilité nomade.....	43
2.5.9 Modèle de poursuite (Pursue model).....	43
2.5.10 Modèle exponentiel corrélé	43
2.6 Les avantages de la mobilité.....	45
2.7 Défis majeurs de la mobilité.....	47
2.8 Quelques Applications des réseaux de capteurs mobiles.....	49
2.8.1 La surveillance médicale.....	49
2.8.2 Pour la surveillance de l'habitat écologique.....	50
2.9 Conclusion	51
3. Les techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	53
3.1 Introduction	53
3.2 Notion de durée de vie du réseau.....	54
3.3 Formes de dissipation d'énergie.....	54
3.3.1 L'énergie de captage	54
3.3.2 L'énergie de traitement (calcul).....	55
3.3.3 L'énergie de communication.....	56

3.4	Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie.....	57
3.4.1	Etat du module radio.....	58
3.4.2	Accès au support de transmission.....	59
3.4.3	Modèle de propagation radio.....	60
3.4.4	Routage des données.....	61
3.5	Les méthodes de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.....	61
3.5.1	Les méthodes proposées pour optimiser l'énergie de capture.....	62
3.5.1.1	Enlever l'échantillonnage inutile	63
3.5.2	Méthodes proposées pour minimiser l'énergie de calcul.....	64
3.5.2.1	techniques d'adaptation dynamique de la vitesse et de la tension du processeur (DVS)	64
3.5.2.2	Techniques de partitionnement du système.....	66
3.5.3	Méthodes proposées pour minimiser l'énergie de communication.....	67
3.5.3.1	Réduire le nombre de communication.....	67
3.5.3.2	Le contrôle de topologie	71
3.6	Conclusion	82
4.	Les techniques de Contrôle de Puissance : Etat de l'art	84
4.1	Introduction	84
4.2	Les méthodes de contrôle de puissance.....	85
4.2.1	Métriques de performance d'une méthode de contrôle de puissance.....	85
4.2.1.1	Consommation énergétique	85
4.2.1.2	La connectivité	85
4.2.1.3	Qualité du lien.....	86
4.2.2	Les méthodes de contrôle de puissance dans les réseaux sans fil.....	86

4.2.2.1 Power Management for Throughput Enhancement in Wireless Ad-Hoc Networks	86
4.2.2.2 An Energy-Efficient Power Control Approach for WLANs	87
4.2.2.3 Local Information No Topology (LINT) and Local Information Link-State Topology (LILT).....	88
4.2.2.4 Mécanisme de contrôle de topologie orienté QoS.....	88
4.2.3 Les méthodes de contrôle de puissance dans les réseaux de capteurs sans fil.....	89
4.2.3.1 Protocole de contrôle de puissance basé sur les informations topologiques.....	91
4.2.3.2 Protocole de contrôle de puissance basé sur la qualité des Liens.....	94
4.3 Conclusion.....	102
5. Contributions à la conservation d'énergie pour réseaux de capteurs statiques et mobiles	104
5.1 Introduction	104
5.2 Contributions pour les réseaux de capteurs mobiles.....	105
5.2.1 La première contribution	105
5.2.1.1 Problématique	105
5.2.1.2 L'algorithme proposé	106
5.2.1.3 Evaluation des performances.....	110
5.2.2 La deuxième contribution.....	119
5.2.2.1 Aperçu sur Zebranet.....	119
5.2.2.2 Contraintes de conceptions fondamentales.....	120
5.2.2.3 La méthode probabiliste avec le seuil fixe PMFT (<i>Probabilistic methods with Fixed threshold</i>).....	121
5.2.2.4 Une méthode probabiliste avec un seuil variant PMVT (<i>Probabilistic method with varying threshold</i>).....	130
5.3 Contribution pour les réseaux de capteurs statiques (Une méthode de contrôle de puissance et de maintien de connectivité).....	141

5.3.1 Paramètres de conception.....	141
5.3.2 La méthode proposée.....	142
5.3.2.1 La conception de la méthode.....	142
5.3.2.2 Description de la méthode DPCM.....	143
5.3.2.3 Exemple illustratif de mise en application	147
5.3.2.4 Evaluations des performances.....	148
5.4 Conclusion.....	156
Conclusion générale et perspectives	158
1 Conclusion	158
2 Perspectives.....	160
A. Détails sur l'implémentation d'un nouveau module sous le simulateur WSNNet et le simulateur Castalia	161
A.1 Le Simulateur WSNNet.....	161
A.2 le simulateur Castalia.....	163
Bibliographie	168
Liste des communications	185

Table des figures

1.1 Architecture matérielle d'un capteur	8
1.2 Architecture logicielle d'un nœud capteur (Pile protocolaire).....	11
1.3 Architecture de communication d'un réseau de capteurs sans fil.....	12
1.4 Quelques domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil.....	16
1.5 Les types d'applications dans les réseaux de capteurs sans fil.....	18
1.6 Les types de communication dans les réseaux de capteurs sans fil.....	19
1.7 Zone de couverture et zone de communication pour un nœud capteur.....	26
2.1 L'architecture du système de navigation et de localisation.....	34
2.2 Les différentes architectures d'un réseau de capteurs mobiles : (a) plane, (b) deux couches et (c) trois couches.....	35
2.3 Classification des modèles de mobilité.....	37
2.4 Le mouvement d'un nœud utilisant le modèle de mobilité de point de cheminement aléatoire.....	38
2.5 Topographie montrant les mouvements des nœuds sous le modèle Manhattan.....	39
2.6 Modèle de mobilité Gauss-Markov.....	40
2.7 Le mouvement des nœuds dans le modèle de mobilité d'autoroute.....	41
2.8 Motif de mouvement de trois nœuds utilisant le modèle RPGM.....	42
2.9 Le graphe utilisé pour les modèles de mobilité d'autoroute, Manhattan et chemin...	44
2.10 Aperçu sur l'architecture du code bleu et ses opérations.....	49
3.1 Modèle radio de consommation d'énergie.....	57
3.2 L'écoute abusive dans une transmission.....	60
3.3 Les méthodes de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.....	62
3.4 Les opérations du protocole LEACH.....	74
4.1 Classification des méthodes de contrôle de puissance pour les réseaux de capteurs sans fil.....	90
4.2 La conception par paire d'ATPC.....	95
4.3 Format de la trame MAC utilisée dans ODTPC.....	96
4.4 Aperçu sur la conception d'ODTPC.....	97
4.5 Aperçu graphique des environnements de test extérieur et intérieur.....	101

4.6 La réception des paquets au niveau du récepteur non concerné pour les deux environnements, extérieur et intérieur.....	101
4.7 La variation du RSSI dans un environnement extérieur et intérieur.....	102
5.1 La phase de découverte de voisinage.....	108
5.2 La phase d'ajustement de la puissance de transmission.....	109
5.3.a L'énergie moyenne consommée en fonction du temps.....	114
5.3.b La consommation d'énergie moyenne par rapport au nombre de nœuds.....	114
5.4 Le facteur de connectivité au fil du temps.....	115
5.5 La durée de vie du réseau.....	116
5.6 Le taux d'interférences moyen par rapport au nombre de nœuds dans le réseau...	117
5.7 Le retard moyen produit par les deux méthodes DPCS et la méthode classique...	118
5.8 Le mouvement des zèbres.....	122
5.9.a L'énergie moyenne consommée au fil du temps.....	127
5.9.b L'énergie moyenne consommée avec différentes densités du réseau.....	128
5.10.a Le retard moyen de PMFT et le régime sommeil/réveil synchrone.....	129
5.10.b Le retard moyen de PMFT et le protocole Greedy.....	129
5.11 Type de mouvement observé par les biologistes.....	132
5.12 Diagramme montrant les différents états et les différentes transitions.....	134
5.13.a La consommation d'énergie de la méthode PMVT et le régime sommeil/réveil synchrone au fil du temps.....	138
5.13.b La consommation d'énergie sous différentes densité du réseau.....	138
5.14.a Le retard de bout en bout de PMVT et protocole Greedy.....	139
5.14.b Le retard de bout en bout moyen de PMVT et le régime sommeil/réveil synchrone.....	140
5.15 Topologie initiale.....	147
5.16 La topologie après la phase de contrôle de puissance.....	147
5.17 L'énergie moyenne consommée.....	151
5.18 La durée de vie du réseau.....	152
5.19 La moyenne des paquets reçus quand les nœuds sont statiques.....	153
5.20 L'énergie moyenne consommée par DPCM et DPCS.....	154
5.21 Le nombre de paquets reçu en moyenne quand les nœuds sont mobiles.....	155

Liste des tableaux

1.1 Comparaison entre les réseaux Ad-Hoc classiques et les réseaux de capteurs.....	30
3.1 Energie consommée par état par le composant radio d'une carte B2400ZB-Tiny.....	58
4.1 La consommation d'énergie pour Chipcon CC1000 dans les réseaux de capteurs sans fil.....	84
5.1 Les puissances de transmission en fonction de la distance.....	109
5.2 Les paramètres de simulations.....	137
5.3 Comparaison entre notre méthode DPCM et les méthodes de contrôle de puissance proposées dans la littérature.....	143
5.4 Energie consommée correspondant à chaque niveau de puissance pour le modèle de radio CC2420.....	149
5.5 Les paramètres de simulation.....	149
5.6 Comparaison entre nos trois contributions.....	157

Table des acronymes

ADC	Analog to Digital Converters
API	Application Programming Interface
AT	Aggregation Tree
ATPC	Adaptive Transmission Power for Wireless Sensor Networks
AWP	Asynchronous Wakeup Protocol
CBR	Constant Bit Rate
CH	Cluster-Head
CPU	Central Processing Unit
CSIP	Collaborative Signal and Information Processing
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear to Send
DACEA	Danube Cross-Border System for Earthquake Alert
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
D-MAC	Data gathering MAC
DPCM	Distributed Power Control method
DPCS	Distributed scheme for transmission Power Control in mobile wireless
DSN	Distributed Sensor Network
DTP	Diverse Transmission Power
DVS	Dynamique Voltage Scalling
ETP	Equal Transmission Power

F_c	Facteur de connectivité
FFT	transformé de Fourier
FRTS	Future Request To Send
FW	FreeWay
Gipsa-Lab	Grenoble Images Parole Signal Automatique –Laboratoire
GPS	Global Positioning System
HT	Hard Threshold
ICMP	Internet Control Message Protocol
ID	Identifiant
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LILT	Local Information Link-State Topology
LINT	Local Information No Topology
LMA	Local Mean Algorithm
LMN	Local Mean of Neighbours Algorithm
LOB	Ligne de Bering
LQI	Link Quality Indicator
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad hoc NETWORKS
MANTIS	Multimodal Networks of In-situ micro Sensor

MEMS	Micro-electro mechanical systems
MN	Mobile Node
MWSNs	Mobile Wireless Sensor Networks
NT	Not Tree node
ODTPC	On Demand Transmission Power Control algorithm
OPC-OA MAC	Optimal Power Control MAC with Overhearing Avoidance
OS	Operating System
OSI	Open Systems Interconnection
OSUG	Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble
PDA	Personal Digital Assistant
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
PMFT	Probabilistic methods with Fixed threshold
PMVT	Probabilistic methods with Variant threshold
PRR	Packet Reception Rate
PTW	Pipelined Wakeup Tone
PUP	Periodic Update Protocol
QoS	Quality of Service
QPUP	The Quasi-Periodic Update Protocol
RAM	Random Access Memory
RAW	Random Asynchronous Wakeup
R_c	Rayon de Communication

RCSF	Réseau de Capteur Sans Fil
RF	Radio frequency
ROM	Read-only memory
RPGM	Reference Point Group Mobility model
R_s	Rayon de Surveillance
RSSI	Radio Signal Strength Indication
RTS	Request to Send
SD	Security Distance
SensIT	Sensor Information technology
S-MAC	Sensor MAC
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
ST	Soft Threshold
STEM	Sparse Topology and Energy Management
SV	Sensed Value
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time division multiple access
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
TinyADMR	TinyAdaptive Demand-driven Multicast Routing
T-MAC	Timeout-MAC
TPSO	A transmission Power Self-Optimization technique for WSN

UDP	User Datagram Protocol
VANET	Vehicular Ad-Hoc Network
WLANs	A wireless local area network
WPANs	Wireless Personal Area Networks
WSN	Wireless Sensor Network

Introduction générale

1. Contexte général du travail et problématique

L'évolution technologique récemment connue dans le domaine de l'électronique, mécanique et aussi le domaine de la communication a donné naissance à une nouvelle génération de réseau, les réseaux de capteurs sans fil. Cette nouvelle ère de l'informatique embarquée promet de révolutionner notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec l'environnement physique qui nous entoure. Les nœuds capteurs qui communique via des liens sans fil et qui sont dotés de capacité de calcul et de collecte de données facilitent une gamme d'applications très variée qui a été irréalisable ou trop chère il y'as quelques années.

Ces petits capteurs miniaturés peuvent être dispersés sur des routes, structures¹, des machines ou peuvent être attachés à des êtres humains, des animaux ou des véhicules pouvant ainsi s'intégrer dans de nombreux domaines d'applications tels que la surveillance des désastres, la supervision de l'habitat écologique, la surveillance médicale, la logistique et le transport intelligent.

De part leur petite taille, les capteurs sont extrêmement contraints. Ils ne peuvent pas se rivaliser avec les ordinateurs et les terminaux utilisés pour les réseaux Ad hoc² classique en termes de traitement des données, de capacité de stockage et de communication. Ainsi, les protocoles implémentés disponible actuellement pour les réseaux Ad hoc ne répondent pas complètement aux spécificités des réseaux de capteurs sans fil.

Contrairement aux réseaux traditionnels qui se préoccupent de la garantie d'une bonne qualité de service, les protocoles des réseaux de capteurs doivent donner l'importance primordiale à la conservation d'énergie.

¹ Bâtiments, ponts ...etc.

² Un réseau Ad Hoc est un réseau sans fil capable de s'organiser sans infrastructure définie préalablement

Les capteurs sont alimentés par des piles limitées en termes d'énergie, quand le nœud capteur épuise son énergie il sera considéré comme mort. Par ailleurs, recharger les batteries dans les réseaux de capteurs est parfois impossible en raison de l'emplacement inaccessible des nœuds ou pour la simple raison que cette opération est pratiquement ou économiquement irréalisable. Ils doivent donc fonctionner en suivant un plan d'économie d'énergie efficace. A cet égard, de nombreux travaux traitent ce problème en cherchant à optimiser la consommation d'énergie au niveau de la couche physique, MAC ou réseau.

La majorité des applications de réseaux de capteurs sans fil existantes exigent un réseau de capteurs statique. Cependant, récemment, les applications qui nécessitent des capteurs mobiles émergent. L'application Zebranet [P. Juang et al., 2002] est un exemple de réseaux de capteurs mobiles qui permet l'étude du comportement des zèbres. Par ailleurs, la plus part des travaux proposés pour l'économie de l'énergie ont été conçu pour des réseaux statiques. En outre, dans les réseaux de capteurs orientés événements, l'information doit être acheminé à la station de base dans des meilleurs délais. Dans ce cas il est nécessaire d'optimiser conjointement la latence et la consommation d'énergie.

Partant de ce constat, nous nous intéressons au problème de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs mobiles et aussi statiques. Nos travaux visent à prolonger la durée de vie des nœuds et par conséquent augmenter la longévité du réseau sans dégrader les performances liées à la communication des données tel que la connectivité et la latence.

2. Objectifs de la thèse

Etant donnée les applications prometteuses ainsi que les problématiques liés aux réseaux de capteurs, l'objectif de cette thèse consiste à étudier et à proposer des algorithmes distribués permettant d'apporter une solution aux problèmes liés à la conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs mobiles et statiques. Nous nous sommes également attachés au problème de maintien de connectivité et aussi la latence.

3. Principales contributions de la thèse

Les contributions de cette thèse s'étalent sur les deux types de réseaux : statiques et mobiles

- **Contributions sur les réseaux de capteurs mobiles**

Tout d'abord, nous avons proposé un algorithme de conservation d'énergie et de maintien de connectivité basé sur la technique de contrôle de puissance. Étant donné que le niveau de la puissance de transmission utilisée a un impact non seulement sur l'énergie consommée mais aussi sur la connectivité. Nous avons proposé d'adapter la puissance de transmission en fonction des informations topologiques sur les voisins à deux sauts. Les résultats de simulations ont démontré qu'en plus de la réduction importante de la facture énergétique, une bonne connectivité est assurée.

Le deuxième apport de cette thèse est la proposition de deux méthodes probabilistes pour le contrôle de l'état de la radio. Ces deux méthodes ont pour objectifs la minimisation conjointe de la consommation d'énergie et la latence. Elles étaient proposées pour le réseau mobile Zebranet ce qui fait leur originalité. L'idée de base de ces deux méthodes est à chaque instant le restant de la batterie est comparé à un seuil pré-calculé si le restant de la batterie est inférieur au seuil, le nœud passe de l'état détection à l'état relais. Les deux méthodes se différencient dans leurs manières de définir le seuil. La première méthode propose un seuil fixe pour tous les nœuds mobiles calculés en utilisant la loi de poisson. Tandis que la deuxième méthode définit le seuil d'une manière différente, elle propose de calculer pour chaque nœud son propre seuil, qui varie au fil du temps, en prenant en compte la vitesse et l'énergie résiduelle du nœud. Le changement de l'état de la radio permet de diminuer l'énergie consommée par chaque nœud mobile. La latence est diminuée en intégrant les interférences comme critère pour le choix du nœud relais.

- **Contribution sur les réseaux de capteurs statiques**

Dans le cadre des réseaux de capteurs statiques nous nous sommes intéressés aussi au problème d'énergie et de maintien de connectivité. Nous avons proposé un algorithme distribué pour les réseaux de capteurs statiques multi sauts qui peut être adapté facilement aux réseaux mobiles et qui a pour objectif la minimisation de l'énergie consommée sans dégrader la connectivité entre les nœuds. L'algorithme est basé sur le contrôle de puissance. périodiquement chaque nœud adapte sa puissance de transmission en se basant sur les informations de son voisinage à un et à deux saut. En comparant notre algorithme avec d'autres algorithmes existants, nous avons remarqué qu'il minimise l'énergie consommée et il assure une bonne connectivité même dans le cas d'un scénario mobile.

4. Organisation de la thèse

Ce manuscrit s'articule autour de cinq chapitres

Chapitre 1 : Les réseaux de capteurs définitions et concepts de base : ce chapitre représente une introduction au domaine des réseaux de capteurs sans fil, nous retraçons les principales notions de base des réseaux de capteurs telles que l'architecture matérielle et logicielle du nœud capteur, voir comment ils sont déployés pour former des réseaux de capteurs sans fil, les domaines d'applications et nous terminons le chapitre par une petite comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux Ad Hoc classiques.

Chapitre 2 : Les réseaux de capteurs mobiles : Dans ce chapitre, nous introduisons les réseaux de capteurs mobiles, nous exposons les différentes architectures proposées pour ces derniers et les modèles de mobilité existants. Nous présentons également les problèmes rencontrés par ce type de réseau. Et nous terminons par quelques applications proposées pour les réseaux de capteurs mobiles.

Chapitre 3 : Les techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil : Ce chapitre est une étude bibliographique sur les techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans cette étude, nous décrivons la problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Nous présentons aussi un panorama de techniques de conservations d'énergie proposées pour minimiser l'énergie consommée par les trois tâches : collecte, calcul et communication des données.

Chapitre 4 : Les techniques de Contrôle de Puissance : Ce chapitre est dédié aux techniques de contrôle de puissance. Dans ce chapitre nous explorons les méthodes de contrôle de puissance proposées pour les réseaux sans fil d'une façon générale et plus précisément celles proposées pour les réseaux de capteurs sans fil. Nous proposons également une classification des méthodes proposées pour les réseaux de capteurs en se basant sur un certain nombre de critères.

Chapitre 5 : Contributions à la conservation d'énergie pour réseaux de capteurs statiques et mobiles : Ce chapitre constitue le cœur de cette thèse. Il est consacré à la présentation de nos contributions dans le domaine de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs mobiles et statiques. Nous présentons également l'évaluation des performances réalisée pour nos trois contributions.

Enfin, nous clôturons cette thèse par une conclusion qui rappelle les principales contributions de cette thèse. Elle présente également les perspectives de recherche des travaux réalisés.

Chapitre 1

Les réseaux de capteurs : définitions et concepts de base

1.1 Introduction

Les capteurs existent depuis plusieurs années dans les domaines de l'industrie tels que l'aéronautique, l'automobile. On observe actuellement une forte recrudescence de ce type d'équipements qui sont interconnectés pour former des réseaux de capteurs. Avant, ils étaient reliés directement à leur base de traitement par une liaison filaire, ces capteurs sont maintenant de plus en plus interconnectés par ondes radios (ZigBee par exemple). En 2003, selon le magazine Technology Review du MIT, le réseau de capteurs sans fil est l'une des dix nouvelles technologies qui bouleverseront le monde et notre manière de travailler et de vivre.

Successeur des réseaux Ad hoc, cette nouvelle génération de réseau est motivée par la convergence connue récemment entre les domaines de technologie « MEMS¹ » (Micro-electro mechanical systems), de communication sans fil et d'électronique numérique. Un réseau de capteur répond au besoin accru d'observer et de contrôler des phénomènes physiques et biologiques dans différents domaines. Chaque capteur collabore avec ses voisins via des liens sans fil, et si nécessaire doit retransmettre les informations venant de capteurs trop éloignés pour communiquer directement avec la station de base qui à son tour retransmet ces données, après les avoir traitées, au utilisateur final du réseau. La conception des capteurs à petite taille et à faible coût qui ont la capacité de traiter, détecter, stocker et communiquer des données, et de les intégrer dans ce qu'on appelle réseaux de capteurs sans fil ouvre la possibilité de les intégrer dans différents domaines d'applications allant de la surveillance

¹ Techniques de micro fabrication utilisée pour fabriquer des systèmes qui combinent des composants micro mécaniques (senseur et actuateur) de dimensions typiques entre 1micron et 100 microns avec une électronique et un traitement de l'information.

militaire à la surveillance médicale en passant par la domotique, l'écologie, la télématique et la logistique. Vu leur conception, les réseaux de capteurs se diffèrent des réseaux ad Hoc traditionnels en un ensemble de points qui sont :

- Les réseaux de capteurs ont plus de nœuds avec une plus haute densité.
- Les nœuds dans les réseaux de capteurs sont assez fragiles et vulnérables à diverses formes de défaillances : faible capacité d'énergie, faible débit, cassure, etc.

Dans ce présent chapitre, nous retraçons les principales notions de base des réseaux de capteurs tel que l'architecture matérielle et logicielle du nœud capteur, voir comment ils sont déployés pour former des réseaux de capteurs sans fil, les domaines d'applications et nous terminons le chapitre par une petite comparaison entre les réseaux de capteurs et les réseaux Ad Hoc classique.

1.2 Définitions

1.2.1 Un capteur

Le capteur est un instrument de mesure qui permet de transformer une grandeur physique ou chimique observée (température, humidité, l'accélération, les vibrations, etc...) en un signal électrique. Cette transformation doit être le reflet aussi parfait que possible de ces grandeurs [F.Brissaud et al., 2008]. Pour cela il possède au moins un transducteur responsable de la conversion de la grandeur physique en une autre.

1.2.2 Un capteur intelligent

Ces dernières années ont vu apparaître le concept de capteur intelligent (smart sensor). Un capteur intelligent est un système composé de plusieurs sous systèmes dont les fonctions sont distinctes. Il combine entre l'acquisition des données, le traitement de l'information et la communication bidirectionnelle des données traitées au monde extérieure. Contrairement au capteur classique, il intègre un microprocesseur embarqué qui a pour rôle la modification du comportement interne du capteur afin d'optimiser sa capacité à collecter les données, ou simplement pour effectuer localement des conditionnements de signaux et des traitements de données [F.Brissaud et al., 2008]. Pour ne pas rompre avec la terminologie la plus usuelle, dans le reste de ce document, lorsqu' on parle de capteur nous faisons référence au capteur intelligent.

1.3 Architecture matérielle d'un nœud de capteur

Selon le type d'application, il existe une variété de capteurs qui peuvent être regroupés en trois classes : Les capteurs optiques, les capteurs thermiques et les capteurs mécaniques. Une architecture matérielle applicable à la plupart des capteurs intelligents est proposée sur la figure 1.1 [M. Ilyas and I. M, 2005].

Un capteur contient quatre unités de base : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de contrôle d'énergie. Selon le domaine d'application, des modules supplémentaires peuvent être ajoutés tel qu'un système de localisation (GPS), ou bien un système générateur d'énergie (cellule solaire). Quelques micro-capteurs plus volumineux, sont dotés d'un système mobilisateur chargé de les déplacer en cas de nécessité.

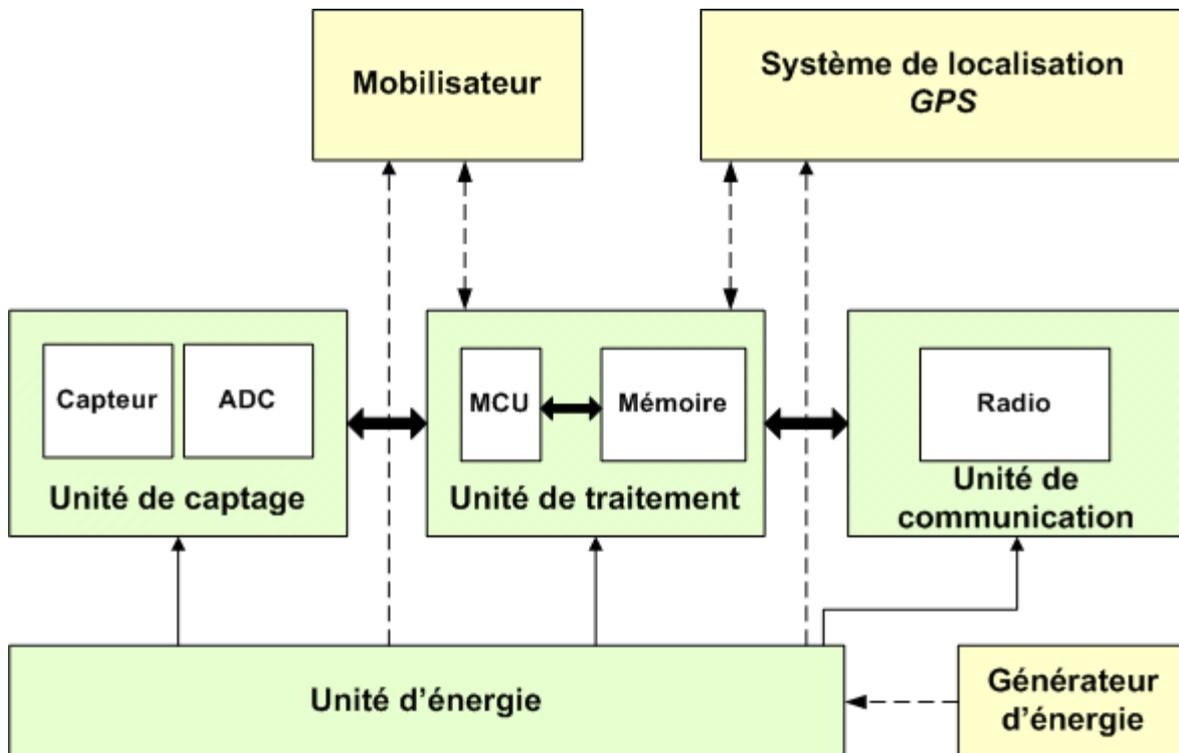


FIG.1.1 – Architecture matérielle d'un capteur [M. Ilyas and I. M, 2005].

- Unité de captage

C'est l'unité qui est chargée de capter des grandeurs physiques (Chaleur, humidité, vibrations, rayonnement, etc..) et de les transformer en grandeurs numériques (un signal électrique). Cette unité peut incorporer de un jusqu' à plusieurs capteurs plus une unité ADC (Analog to Digital Converters). Le rôle de cette dernière consiste à convertir le signal analogique produit

par les capteurs, qui est basé sur les données échantillonnées, en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement [M. Ilyas and I. M, 2005].

- **Unité de traitement**

Unité de traitement peut être considérée comme l'organe intelligent du capteur. Elle inclut un processeur qui est généralement associé à une petite unité de stockage. Elle gère des programmes et des logiciels, stocke en mémoire les paramètres métrologiques et fonctionnels (dont la datation est permise par l'horloge interne) ; elle assure les traitements des données reçues de l'unité de captage. Généralement l'unité de traitement commande les autres unités.

[KAHN P et al., 2010] Les processeurs utilisés dans les réseaux de capteurs sont à faible consommation d'énergie et à faible fréquence. Moins de 10 Mhz pour une consommation de 1 mW. Aussi la mémoire de stockage est très limitée, elle est de l'ordre de 10Ko de RAM pour les données et 10 Ko de ROM pour les programmes. Cette mémoire consomme la majeure partie de l'énergie de l'unité du traitement. Dans la plus part des cas on lui adjoint, une mémoire flash moins coûteuse en termes d'énergie [K.Holger and A.W, 2005].

- **Unité de communication**

Cette unité assure la connexion entre les nœuds du réseau. Un module radio (émetteur/récepteur) est intégré à cette unité qui permet la communication entre différents nœuds du réseau. La communication peut être de type optique ou radio fréquence [Qinghua.W and I. B, 2010]. Elle est responsable de la transmission-réception des données captées et traitées via un canal de communication sans fil. Le module radio c'est le module qui consomme le plus d'énergie.

- **Unité d'énergie**

Pour les réseaux de capteurs, l'unité d'énergie est la composante la plus importante, qui représente généralement une batterie. Cette batterie est de petite taille et de capacité énergétique limitée. Souvent, les capteurs sont placés dans des environnements hostiles, inaccessibles par l'être humain et elle n'est généralement pas remplaçable. Dans ce genre de situation, il est pratiquement impossible de recharger ou de remplacer la batterie. Pour cela, l'énergie représente la contrainte principale lors de la conception d'un réseau de capteurs sans fil puisqu' elle influe sur la durée de vie du nœud capteur et donc la durée de vie du réseau [M. Ilyas and I. M, 2005]. Cependant, il est possible d'utiliser des systèmes de rechargement

d'énergie à partir de l'environnement via des cellules photovoltaïques, par exemple, pour étendre la durée de vie de la batterie. En fonction des besoins de l'application du réseau de capteur le nœud capteur peut intégrer d'autres unités tels que :

- **Système de localisation** : pour pouvoir déterminer la position du nœud.
- **Mobilisateur** : permet le changement de position du nœud

1.4 Architecture logicielle d'un nœud capteur (la Pile protocolaire)

Pour faciliter l'interconnexion des systèmes issus de différents constructeurs, l'organisme ISO²[5] propose un découpage fonctionnel de l'ensemble du processus communiquant d'un réseau. Ce découpage fonctionnel est décrit dans le modèle OSI avec une structuration en sept couches (la couche physique, la couche liaison, la couche réseau, la couche transport, la couche session, la couche présentation, la couche application). Pour les réseaux de capteurs, le modèle OSI apparaît en réalité trop complet voire trop complexe. En effet, très peu d'applications ont besoin d'un découpage en sept couches, et en réalité pour les réseaux de capteurs quatre couches sont suffisantes [I. Akyildiz et al., 2002]. Les nœuds du réseau y compris la station de base utilisent le modèle en couche. Ce modèle contient cinq couches qui ont le même rôle des couches OSI : la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique. De plus, on trouve trois autres plans qui prennent en charge la gestion de l'énergie, la mobilité et les tâches [I. Akyildiz et al., 2002] . Comme illustré dans la figure 1.2.

Selon le type d'application du réseau de capteur, différents logiciels peuvent être construits et exploités au niveau de la couche application. La couche transport a pour rôle la gestion du flux de données si l'application l'exige. La couche réseau achemine les données issues de la couche transport. Le protocole MAC (Media Access Control) de la couche liaison gère les méthodes d'accès au support physique. Il doit tenir compte aussi de la consommation d'énergie et doit réduire les collisions entre les nœuds du réseau. La couche physique assure les transmissions et les réceptions des bits de données. Elle s'occupe aussi de la modulation des données.

² L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est le premier producteur mondial de Normes internationales d'application volontaire. L'ISO est une organisation non gouvernementale, indépendante, composée de membres qui sont les organismes nationaux de normalisation de 162 pays. Son Secrétariat central est basé à Genève, en Suisse.

En outre, les trois plans de gestion de l'énergie, la mobilité et les tâches sont très importants en termes de la surveillance de la puissance, le mouvement et la distribution des tâches, respectivement, entre les nœuds capteurs. Ces plans de gestion sont primordiaux pour le fonctionnement des nœuds capteurs parce qu'ils collaborent ensemble d'une manière efficace afin de préserver l'énergie, router les données dans un réseau de capteurs mobiles et partager les ressources entre eux.

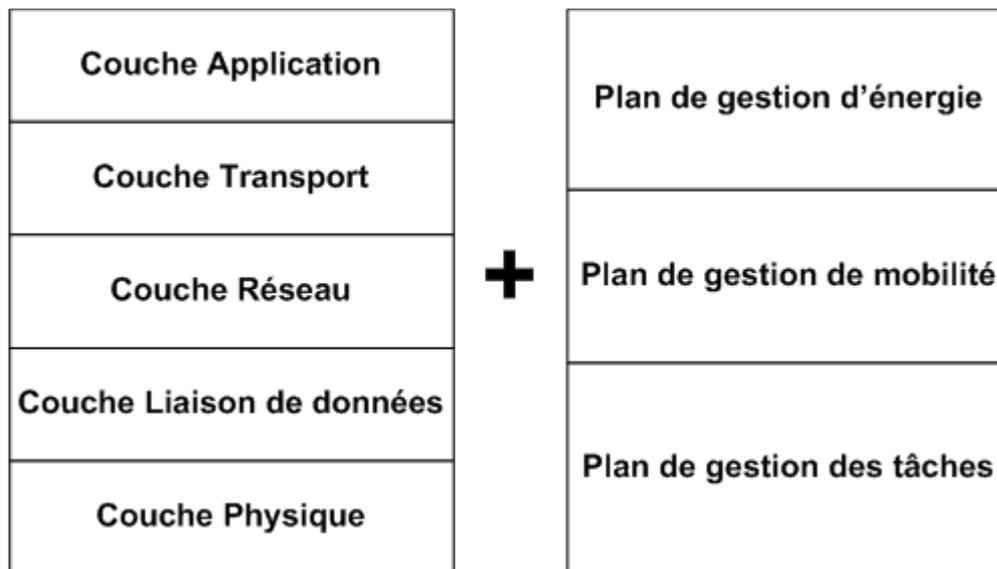


FIG.1.2 – Architecture logicielle d'un nœud capteur (Pile protocolaire). [I. Akyildiz et al., 2002]

1.5 Architecture de communication d'un réseau de capteurs

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) ou wireless sensor network (WSN) en anglais est un type particulier des réseaux *Ad Hoc*. Il est généralement constitué d'un ensemble de petits capteurs répartis dans une zone géographique appelée zone de captage ou zone d'intérêt d'une manière plus au moins aléatoire. Le nombre de capteurs déployés dans la zone d'intérêt, varie selon le besoin de l'application. Il peut être dans l'ordre de quelques dizaines à de milliers de capteurs.

Les nœuds capteurs sont capables de surveiller un phénomène physique sur l'environnement qui les entoure et de collecter des données d'une manière autonome. Les données captées sont acheminées à un nœud considéré comme un "point de collecte", appelé nœud-puits (ou sink en anglais) ou station de base (base station). Le nœud puits transmet ces données à l'utilisateur final du réseau à travers un réseau de communication (internet, satellite,...) pour

analyser ces données et prendre des décisions. L'utilisateur du réseau peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises et récolter les données environnementales captées en utilisant la station de base comme passerelle. Cette architecture est illustrée dans la figure 1.3 [I. Akyildiz et al., 2002] .

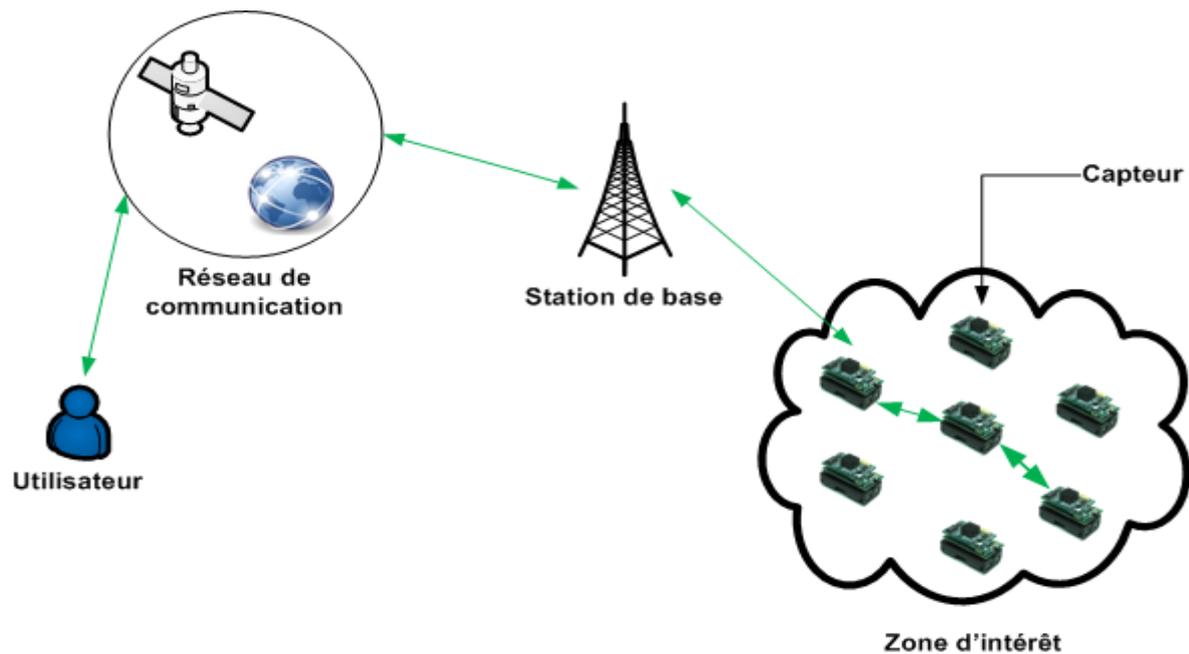


FIG.1.3 – Architecture de communication d'un réseau de capteurs sans fil.

1.6 Les domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil

La miniaturisation, le faible coût, l'absence de câblage sont une variété de caractéristiques des réseaux de capteurs qui ont permis à cette nouvelle génération de réseaux d'envahir plusieurs domaines d'applications. Parmi les domaines d'applications ou les réseaux de capteurs sans fil se révèlent très utiles et leur déploiement a une importance cruciale, on trouve le domaine militaire, le domaine environnemental, le domaine de la santé, le domaine écologique, les maisons intelligentes, etc.

- Applications militaires

Comme tous les autres domaines de recherche qui portent sur la technologie de l'information, les réseaux de capteurs sans fil sont issus des recherches militaires. Leurs faibles coûts, l'absence de câblage, l'auto-configuration et la tolérance aux pannes ont laissé cette nouvelle

aire de l'informatique embarquée de connaître un grand succès dans ce domaine. Les capteurs sont déployés d'une manière autonome pour aider les militaires dans leurs missions en surveillant les activités de l'ennemi ou en analysant le champ de bataille avant d'y envoyer les troupes pour la détection d'éventuelles menaces (détection d'une menace biologique, nucléaire et chimique).

De nombreux projets ont été menés et financés par l'Agence Américaine pour les Projets de Recherche Avancée de Défense (DARPA pour Defense Advanced Research Projects Agency). Parmi ses projets, le projet DSN (Distributed Sensor Network) [C.Y and S.P, 2003] qui était l'un de ses premiers projets dans les années 80 et le projet SensIT (Sensor Information technology) [S. Kumar and D. S, 2001]. Une autre application importante des réseaux de capteurs dans le domaine militaire consiste en leur incorporation dans les systèmes de guidage des munitions intelligentes [Yves B and Aude-E. F, 2007].

- **Applications médicales**

Les réseaux de capteurs sans fil ont été intégrés dans le domaine de la médecine pour assurer une surveillance permanente des malades. Des micro-capteurs peuvent être avalés ou placés sous la peau pour surveiller la glycémie, la tension artérielle, etc [P. Johnson and D.C, 1996].

Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies (détection d'un cancer, surveiller le rythme cardiaque, etc...). D'autre part, les capteurs peuvent signaler un comportement anormal chez les personnes handicapées ou âgées (chute d'un lit, choc, cris, etc...).

- **Applications environnementales**

L'intégration des réseaux de capteurs sans fil dans le domaine environnemental a donné naissance à plusieurs types d'applications. Ils peuvent aider dans la surveillance météorologique, activité sismique, la détection des risques naturels, détection d'éventuelles pollutions (la pollution des eaux, l'air et le sol).

Le déploiement des thermo-capteurs dans des forêts ou des usines peut prévenir d'éventuels incendies et par la suite faciliter la lutte contre le feu et permet d'éviter les dégâts. L'utilisation des capteurs chimiques dans les milieux urbains et dans les sites industriels aide à la détection des pollutions. Par ailleurs, des projets récents ont été lancés pour bien couvrir l'étude de l'environnement, SensorScope [1] en est l'illustration. Ce projet de l'école

polytechnique Fédérale de Lausanne vise à développer un système de mesure de l'environnement à grande échelle pour la surveillance du réchauffement climatique. Dans ce système des capteurs alimentés à l'énergie solaire ont été utilisés, amenant à des mesures de haute densité spatiale et temporelle.

- **La domotique**

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, etc... [E.M et al., 2000]. Ces micro-capteurs facilitent la tâche aux utilisateurs en leur permettant de contrôler ces appareils domestiques localement ou à distance via un réseau externe.

Grâce aux avancées en informatique ambiante, ces dernières années, un nouveau paradigme successeur de la domotique est né : les maisons intelligentes [Basma M et al., 2013]. Placer des capteurs de mouvement ou de température sur les murs ou le plafond permet d'automatiser plusieurs tâches de l'utilisateur tels que : le contrôle de la lumière et la climatisation en fonction du mouvement des personnes. Ils peuvent aussi être déployés pour former un système de sécurité en déclenchant une alarme dans la présence d'un intrus.

- **Supervision des structures et des phénomènes sismiques**

L'intégration des réseaux de capteurs dans la surveillance des structures civiles (bâtiments, ponts, routes, des aéronefs) peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à leur surveillance. A l'heure actuelle, la surveillance de ces structures se fait manuellement ou visuellement ou occasionnellement par des technologies onéreuses en temps et en argent, tels que les rayons X et ultrasons.

Ainsi, l'intégration des capteurs dans les structures civiles permet de détecter un début de fissures ou d'autres dommages structuraux suite à un séisme ou vieillissement de la structure [Ning et al., 2004]. Par ailleurs, l'utilisation de capteurs sismiques en réseaux présente de nombreux avantages.

Le système DACEA (Danube Cross-Border System for Earthquake Alert) [2] est la dernière création de l'Institut national de physique de la terre et à pour but de prévenir plus efficacement, et avec un gain de 30 secondes environ sur les méthodes actuelles, les tremblements de terre entre la Bulgarie et la Roumanie. Des sismologues de l'Institut des

sciences de Grenoble ont réussi à utiliser les ondes de volume du bruit sismique pour visualiser les structures profondes du manteau terrestre à l'aide d'un réseau de 42 stations sismologiques au nord de la Finlande [3]. Un projet d'un an a été lancé par Gipsa-Lab [4] en janvier dernier pour le laboratoire OSUG avec pour objectif de localiser les chutes de séracs et les écoulements sous-glaciaires en enregistrant les signaux sismiques. Le réseau de capteurs permettra également de caractériser le débit des sources d'eau qui alimentent les barrages ou de mieux connaître les écoulements d'eau intra-glaciaires.

- **Applications industrielles et commerciales**

L'utilisation des réseaux de capteurs dans le domaine commercial peut améliorer le processus de stockage et de livraison de marchandises. A titre d'exemple, chaque article dans un magasin pourrait avoir un nœud capteur qui lui est attaché, dès lors, les utilisateurs pourront facilement localiser l'article et calculer la quantité exacte de chaque catégorie d'article. Si des utilisateurs veulent insérer de nouveaux inventaires, ils n'auront qu'à attacher les capteurs appropriés à ces inventaires.

Une autre application commerciale des réseaux de capteurs est le dépistage et la surveillance de véhicule. Deux approches ont été proposées pour la détection et le dépistage des véhicules [E.Shih et al., 2001] . La première consiste à déterminer localement la ligne de roulement de la voiture dans un secteur donné, et l'envoyer par la suite à la station de base. Par contre, la deuxième renvoie directement les données brutes collectées par les nœuds capteurs à la station de base pour localiser le véhicule.

Les réseaux de capteurs peuvent être aussi utilisés dans des entreprises manufacturières pour offrir une meilleure qualité de service en poursuivant automatiquement le procédé de production à partir des matières premières jusqu'au produit final livré.

- **La surveillance de l'habitat écologique**

La surveillance de l'habitat écologique (animaux, végétaux, micro-organismes) [A. M et al., 2002] est traditionnellement effectuée par des enquêteurs sur le terrain. En effet, les chercheurs en biologie sont de plus en plus préoccupés par les impacts potentiels de la présence humaine sur les plantes et les animaux lors de la surveillance du terrain. Il est possible que les perturbations humaines chroniques peuvent fausser les résultats en changeant les comportements ou les distributions des organismes surveillés, tandis que les perturbations

anthropiques peuvent sérieusement réduire ou même détruire des populations sensibles par l'augmentation du stress, réduire le succès de reproduction, l'augmentation de la prédation, etc.

Les réseaux de capteurs sont très promoteurs par rapport aux méthodes traditionnelles de surveillance. Vu leurs densités spatio-temporelles, les réseaux de capteurs peuvent fournir des données expérimentales d'une richesse sans précédent. Ils peuvent être déployés avant le début de la saison de reproduction ou d'autres périodes sensibles (dans le cas des animaux) ou si les plantes sont dormantes ou le sol est gelé (dans le cas d'étude de botanique). L'une des premières expériences faites pour la supervision de l'habitat est menée par une équipe de chercheurs du laboratoire de recherche *d'Intel à Berkeley*, de l'université de Californie à Berkeley, et du collège de l'atlantique à *Bar Harbor*. Un réseau de capteurs sans fil a été déployé à Great Duck Island dans le golfe du Maine [A. M et al., 2002], dans et autour des terriers de « L'Océanite cul-blanc ou Pétrel cul-blanc »³. La figure 1.4 ci-dessous montre quelques domaines d'applications cités précédemment.

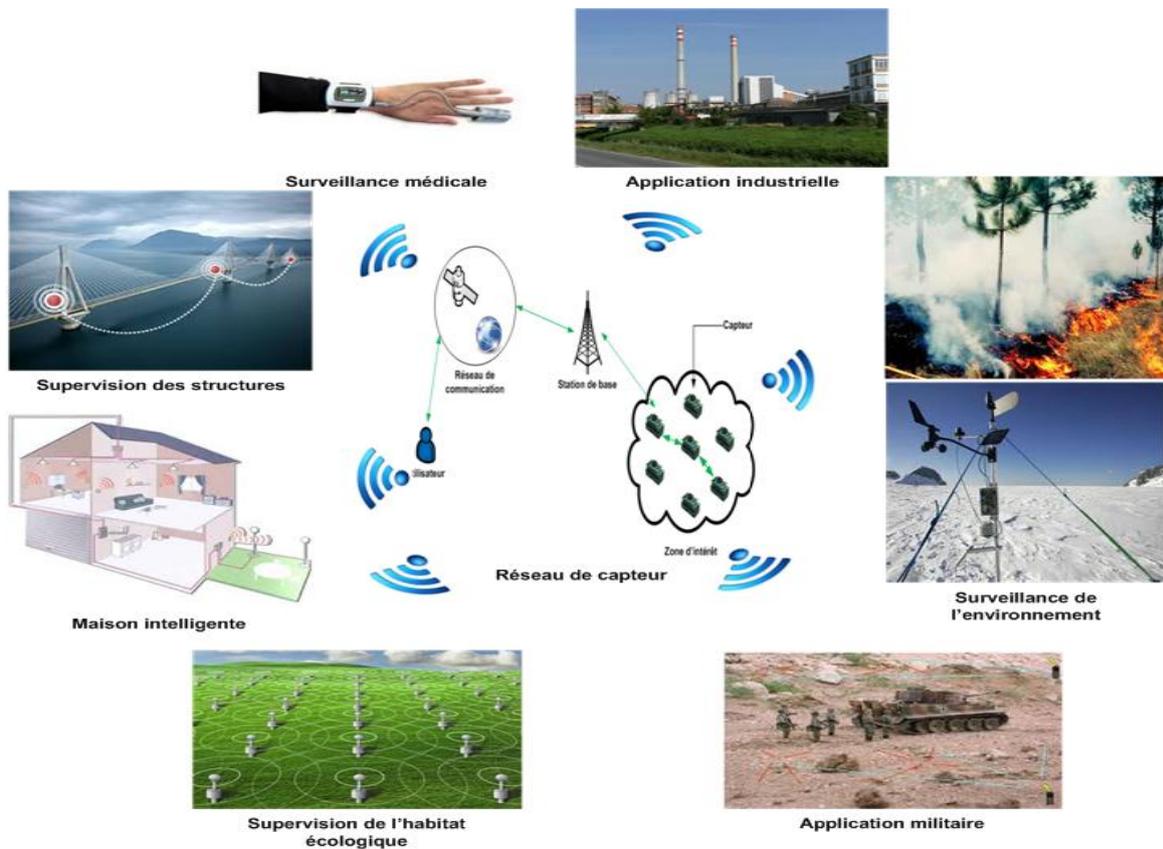


FIG.1.4 – Quelques domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil

³ C'est une espèce d'oiseau de mer de la famille des hydrobatidés

1.7 Classification des réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sont des réseaux orientés application. De ce fait, leurs caractéristiques se diffèrent d'un domaine d'application à un autre. Ils se distinguent par le type d'application pour laquelle ils sont conçus, le mode de communication [Yacine Y, 2012], la mobilité, et selon la capacité des nœuds dans le réseau [Yacine Y, 2012].

1.7.1 Selon le type d'application

Le mode de collecte et de livraison des données dans les réseaux de capteurs dépend étroitement du type d'application. Ainsi, les applications des réseaux de capteurs sans fil RCSF peuvent être classés en quatre types d'applications : orientées temps (*time driven*), orientées événements (*event driven*), orientées requêtes (*query driven*) et hybrides [M. Ilyas and I. M, 2005].

- *Applications orientées-temps*

Dans ce type d'application, les capteurs font leur échantillonnage d'une manière périodique dans des intervalles de temps réguliers. Ensuite ils envoient ces données captées à la station de base périodiquement, figure 1.5. (a). Un exemple d'utilisation de ce type de réseau est la collecte des données environnementales (agriculture, étude de phénomène naturel ...).

- *Applications orientées événement*

Dans ce type d'applications les capteurs envoient les données à la station de base seulement si un événement spécial se produit. A titre d'exemple, l'événement peut être la détection de la fumée, figure 1.5. (b). Ce type de réseau peut être appliqué dans différents domaines tels que la surveillance médicale (surveillance de taux de glycémie dans le sang), le contrôle d'édifice (les barrages, les voies des chemins de fer...), la surveillance militaire, etc.

- *Applications orientées requêtes*

Dans les applications orientées requêtes les capteurs font un échantillonnage à la demande de la station de base. Lorsqu'un capteur reçoit une requête de la part de la station de base, il déclenche la collecte de données. Après il envoie ces données collectées à la station de base, figure 1.5. (c). Cette catégorie de réseau est destinée aux applications adaptées à l'utilisateur (demande des informations sur une région bien précise). Dans ce type de réseau la topologie et la position des nœuds doivent être connues.

- *Application hybride*

Le type d'application hybride est une combinaison entre les trois types d'applications précédemment décrites. Par exemple, dans un réseau conçu pour le suivi d'objets, le réseau peut combiner entre un réseau de surveillance (*time-driven*) et un réseau de collecte de données par événements (*event-driven*). Par exemple, pendant les longues périodes d'inactivité des capteurs et lorsqu'aucun objet n'est présent, le réseau peut assurer une fonction de surveillance.

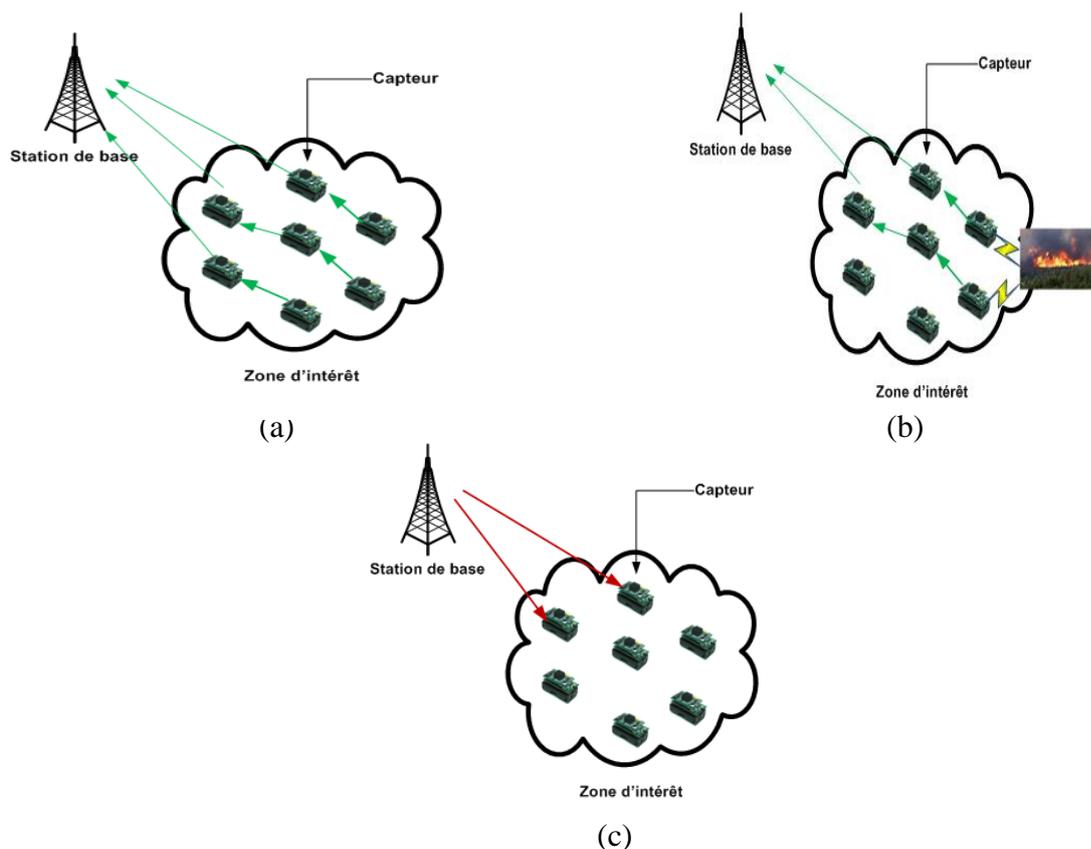


FIG.1.5 – Les types d'applications dans les réseaux de capteurs sans fil

1.7.2 Selon le mode de communication

Le mode de communication utilisé dans le réseau de capteurs dépend du type d'application et des techniques utilisées pour faire acheminer l'information des capteurs à la station de base. On distingue dans cette classification trois types de communication : les réseaux de capteurs à un seul-saut (single-hop WSN), les réseaux de capteurs multi-sauts (multi-hop WSN) et les réseaux de capteurs hiérarchiques.

Dans les réseaux de capteurs à un seul-saut, les nœuds capteurs envoient les données collectées directement à la station de base sans passer par des nœuds intermédiaires. Dans ce type de réseau les nœuds envoient leurs données en utilisant une forte puissance comme illustré dans la figure 1.6 (a).

Dans les réseaux de capteurs multi-sauts, un nœud capteur envoie ses données à la station de base par l'intermédiaire de ses nœuds voisins en utilisant une petite puissance de transmission, la figure 1.6 (b) illustre un exemple sur ce type de communication. Ce type de réseau est appliqué dans plusieurs domaines d'application, mais il reste difficile à mettre en œuvre [Shio K. S et al, 2011].

Dans les réseaux de capteurs hiérarchisés, la zone d'observation est divisée en clusters. Un clusterhead est élu pour chaque cluster. Ce dernier s'occupe de récupérer les informations auprès des capteurs dans son cluster et de les transmettre directement à la station de base figure 1.6 (c) ou via un mode multi-saut entre les clusters head figure 1.6 (d) .

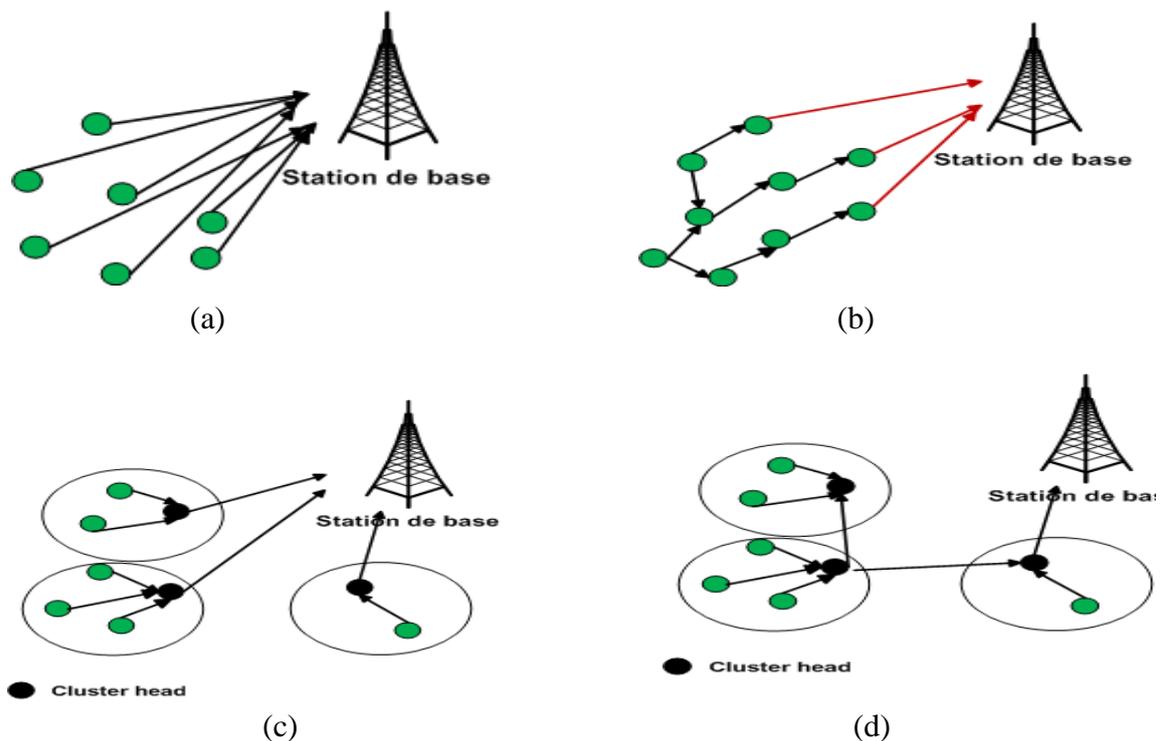


FIG.1.6 – les types de communication dans les réseaux de capteurs sans fil

1.7.3 Selon la mobilité

Selon la mobilité des nœuds on peut avoir deux grandes classes : les réseaux de capteurs statiques (static wireless sensor networks- WSNs) et les réseaux de capteurs mobiles (mobile wireless sensor networks – MWSNs).

La plupart des domaines d'application existante utilisent des réseaux de capteurs statiques, dans ce type de réseaux tous les nœuds capteurs y compris la station de base sont statiques.

Les réseaux de capteurs sans fil mobiles (MWSNs) peuvent être simplement définis comme un réseau de capteurs sans fil (WSN) dans lequel les nœuds de capteurs sont mobiles. MWSNs sont un petit domaine de recherche émergeant comparé à son prédécesseur, les réseaux de capteurs statiques [Javad et al., 2012]. MWSNs sont beaucoup plus polyvalents que les réseaux de capteurs statiques, car ils peuvent être déployés dans n'importe quel scénario et faire face aux changements rapides de la topologie. Le but de ce type de réseau est la plupart du temps l'exploration des zones inaccessibles ou dangereuses. Ce type de réseau est détaillé dans le chapitre 2.

1.7.4 Selon la capacité des nœuds dans le réseau

Dans cette classification on distingue deux catégories : les réseaux de capteurs homogènes et les réseaux de capteurs hétérogènes [Shio K. S et al, 2011] [Chun-H et al., 2007] .

Dans les réseaux de capteurs homogènes tous les capteurs du réseau ont les mêmes caractéristiques. Ils ont les mêmes capacités du point de vue énergie, calcul et stockage. Tandis que dans les réseaux de capteurs hétérogènes on trouve des capteurs sophistiqués qui ont plus de capacité en termes d'énergie et de traitement. Les capteurs sophistiqués peuvent être utilisés pour exécuter les tâches les plus complexes comme les coordinateurs et les chefs des clusters, etc. De ce fait, l'utilisation de ces nœuds augmente la durée de vie du réseau. Cependant, il est difficile à mettre en œuvre du fait qu'au moins chaque type de nœuds du réseau aura un code (programme) propre à lui. Ce qui augmente le coût du développement.

1.8 Systèmes d'exploitation et protocole de communication pour capteurs

Dans cette section nous présentons quelques systèmes d'exploitation dédiés aux réseaux de capteurs, par la suite nous explorons le standard de communication ZigBee que nous avons choisi parmi les autres protocoles de communication pour ses avantages pour les réseaux de

capteurs sans fil. Le rôle du système d'exploitation pour capteur en réseau est d'être l'interface entre des ressources matérielles limitées et des applications distribuées. Il doit fournir une variété de services systèmes basiques comme l'allocation de mémoire, la transmission de données, la gestion de l'énergie, etc.

Le but de ce système est de faciliter la programmation des applications, mais aussi d'optimiser l'utilisation des ressources.

Etant donné que les réseaux de capteurs ont des capacités limitées en termes de calcul, de mémoire et aussi d'énergie, les systèmes d'exploitation développés pour capteurs ont été conçus afin de minimiser considérablement le surcoût qu'engendre l'OS⁴. Parmi ces systèmes on trouve TinyOS, Contiki et Rime, MantisOS et SOS. Nous décrivons également la pile de communication associée à ces systèmes d'exploitation : le standard ZigBee.

1.8.1 TinyOS

TinyOS [Jason H et al., 2000] est un système d'exploitation open-source, événementiel développé à l'université de Berkeley. TinyOS est conçu pour des réseaux de capteurs sans fil, il respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant la taille du code nécessaire à sa mise en place. Cela s'inscrit dans le respect des contraintes de mémoire qu'observent les réseaux de capteurs. Ce dernier possède 3500 octets pour le code du système, en plus d'un espace de 4500 octets disponibles pour d'autres programmes. Pour autant, la bibliothèque de composant de TinyOS est particulièrement complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. L'ensemble de ces composants peut être utilisé tel quel, il peut aussi être adapté à une application précise. Par ailleurs, TinyOS a été conçu pour réduire au maximum la consommation d'énergie du capteur. Ainsi, lorsqu'aucune tâche n'est active, il se met automatiquement en veille.

Ce système d'exploitation s'appuie sur le langage NesC [D. Gay et al., 2003], une surcouche du langage C. Celui-ci propose une architecture basée sur des composants qui sont assemblés statiquement à la compilation, permettant de réduire considérablement la taille mémoire du système et de ses applications.

⁴ OS pour operating system en anglais ce qui signifie le système d'exploitation

1.8.2 Contiki et Rime

Contiki [A. DUNKELS et al., 2004] est également un système d'exploitation open source et événementiel. Il a été conçu par une équipe du centre suédois de recherche scientifique SICS pour les systèmes embarqués fortement contraints en mémoire. Ecris en langage C, ce système d'exploitation utilise le concept de protothread [A. Dunkels et al., 2006] qui permet d'écrire des programmes à événement comme des threads et ce avec un faible surcoût (2 octets et quelques cycles de processeurs). L'empreinte mémoire de Contiki est plus importante que celle de TinyOS [Jason H et al., 2000] mais il rend possible l'ordonnancement avec priorité et fournit une plus grande flexibilité comme le changement dynamique d'applications. Le système Contiki offre deux piles de communication. La première uIP (micro IP) [A. Dunkels, 2003] qui supporte les protocoles IP, TCP, UDP et ICMP. La deuxième, Rime [Adam D et al., 2007] fournit à la couche applicative un jeu d'instructions de communication, permettant les différentes connexions avec les capteurs voisins. Les applications ou les protocoles exécutés au-dessus de la pile Rime peuvent utiliser une ou plusieurs instructions de communication fournies par la pile de communication Rime. Rime peut être associé au mécanisme Chameleon afin de s'adapter aux protocoles de la couches MAC. Chameleon gère la création, la lecture et la transformation des entêtes des protocoles de la couche liaison de données du modèle OSI et communique avec la pile Rime en associant des attributs aux paquets. Les informations importantes des entêtes des protocoles inférieurs pourront ainsi remonter vers la couche applicative ou le protocole situé au-dessus de la pile de communication Rime [Adam D et al., 2007] .

Le système d'exploitation Contiki permet de réduire la consommation d'énergie par rapport à un système d'exploitation traditionnel, tout en gardant une approche de programmation d'un système classique. Cependant, le manque d'étude comparative rend difficile l'évaluation et la comparaison des performances de cet OS vis-à-vis des autres systèmes d'exploitation.

1.8.3 MANTIS OS

MANTIS (Multimodal Networks of In-situ micro Sensor) OS [Shah B et al., 2005] est un système d'exploitation léger (il occupe moins de 500 octet de RAM et environ 14 Ko de flash) et multi- tâches pour capteurs, développé par le groupe Mantis à CU boulder (université de Colorado boulder). Ecris en langage C, ce système supporte plusieurs plates-

formes parmi lesquelles MICA2 et MICAz et les Motes TELOS. Les trois principaux composants de MANTIS OS sont la couche DEV, la couche NET et la couche COM.

La couche DEV fournit un accès aux périphériques d'entrées- sorties. La couche COM permet d'accéder aux périphériques de communication tels que le port série et la radio. C'est à ce niveau où se trouve la couche MAC et où sont gérés le buffering des paquets et les fonctions de synchronisation. La pile de communication est gérée au niveau utilisateur dans la couche NET. Par défaut, un module d'inondations (flooding) est fourni comme protocole de routage.

1.8.4 SOS

SOS [Chih-C et al., 2005] est un OS dédié aux réseaux de capteurs sans fil qui se veut être, au contraire de TinyOS, généraliste, dynamique et modulaire. En effet, la motivation principale de SOS est la reconfiguration dynamique, c'est-à-dire la capacité de modifier individuellement le code présent sur chaque nœud après le déploiement et l'initialisation du réseau. Ceci permet de faire des mises à jour incrémentales du système et d'ajouter de nouveaux modules logiciels après le déploiement du réseau. SOS autorise l'allocation dynamique de la mémoire, aussi bien pour le noyau que pour les modules applicatifs, mais ne possède pas de mécanisme de protection de la mémoire. L'ordonnanceur non préemptif gère les priorités des tâches afin d'éviter de traiter les tâches critiques dans un contexte d'interruption. Le noyau SOS comprend une API⁵ de capteurs qui permet de gérer l'interaction entre les drivers de capteurs et les modules qui les utilisent. Cela conduit à une utilisation plus efficace de l'unité ADC (*Analog to Digital Converters*) et des ressources de détection du nœud capteur.

D'après [Chih-C et al., 2005] la consommation d'énergie du processeur est supérieure d'environ 8 % à 10 % par rapport à TinyOS. Cependant, le bilan présenté ne semble pas tenir compte de la taille de la mémoire nécessaire pour faire fonctionner ce système.

1.8.5 ZigBee

Zigbee [6] est un protocole de communication sans-fil conçu par la ZigBee Alliance basé sur la norme IEEE 802.15.4 qui définit les couches PHY (Physique) et MAC (*Medium Access Control*) pour les réseaux personnels sans fil (Wireless Personal Area Networks :

⁵ Une interface de programmation est un ensemble normalisé de classes, de méthodes ou de fonctions qui sert de façade par laquelle un logiciel offre des services à d'autres logiciels. L'objectif est de fournir une porte d'accès à une fonctionnalité en cachant les détails de la mise en œuvre

WPANs⁶). Le standard ZigBee est donc un standard de communication sans-fil tout comme le Bluetooth [7]. La spécification initiale de ZigBee propose un protocole lent dont le rayon d'action est relativement faible, mais dont la fiabilité est assez élevée, le prix revient faible et la consommation considérablement réduite. On retrouve donc ce protocole dans des «environnements embarqués » où la consommation est un critère de sélection. Ainsi, la domotique et les nombreux capteurs qu'elle implémente apprécie particulièrement ce protocole en plein essor et dont la configuration du réseau maillée se fait automatiquement en fonction de l'ajout ou de la suppression de nœuds (appareils ZigBee). On retrouve aussi ZigBee dans les contrôles industriels, les applications médicales, les détecteurs de fumée et d'intrusion. Les nœuds sont conçus pour fonctionner plusieurs mois (jusqu'à dix ans pour les moins consommant) en autonomie complète grâce à une simple pile alcaline de 1,5 V. Le standard Zigbee offre des caractéristiques qui répondent aux besoins des réseaux de capteurs puisqu'il consomme moins d'énergie que Bluetooth. Le petit débit qu'il offre (250 Kbps contre 1 Mbps pour Bluetooth⁷) n'est pas vraiment un handicap pour un réseau de capteurs puisque la taille des paquets échangés n'est pas vraiment importante.

1.9 Contraintes des réseaux de capteurs

La conception et la mise en place d'un réseau de capteurs sans fil pour les domaines et les types d'applications citées précédemment, exigent les techniques et les protocoles qui prennent en considération les contraintes et les exigences liées à ce type de réseau. Ils sont considérés également comme métriques de performance pour évaluer des travaux dans le domaine. Parmi ces contraintes nous citons : la consommation énergétique, la couverture, la connectivité, la tolérance aux pannes, le passage à l'échelle, la topologie dynamique, la bande passante limitée et l'agrégation de données.

1.9.1 La Consommation énergétique

Les nœuds capteurs, étant des dispositifs microélectroniques, peuvent être seulement équipés d'une batterie faible en énergie (< 0.5 Ah, 1.2V). Dans la plupart des applications, cette batterie est irremplaçable. La durée de vie du nœud capteur dépend fortement de la durée de vie de sa batterie. Cette énergie est consommée par les différentes unités du capteur afin de

⁶ Concerne les réseaux sans fil d'une faible portée : de l'ordre de quelques dizaines de mètres

⁷ Lancée par Ericsson en 1994, proposant un débit théorique de 1 Mbps pour une portée maximale d'une trentaine de mètres. Bluetooth, connue aussi sous le nom *IEEE 802.15.1*, possède l'avantage d'être très peu gourmande en énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée à une utilisation au sein de petits périphériques

réaliser les tâches de collecte de données (captage), le traitement de ces derniers et leurs communications [W. Heinzelman et al., 2000].

La transmission de données est la tâche qui consomme le plus d'énergie [G. Pottie, W.K, 2000]. Par ailleurs, la plupart des applications des réseaux de capteurs sont basés sur la communication multi-sauts, chaque nœud joue à la fois un rôle d'initiateur de données et de routeur également, la défaillance d'un certain nombre de nœuds entraîne un changement significatif sur la topologie globale du réseau, et peut nécessiter un routage de paquets différent et une réorganisation totale du réseau. C'est pour cela que le facteur de consommation d'énergie est d'une importance primordiale dans les réseaux de capteurs.

1.9.2 La couverture

Parmi les méthodes utilisées dans la conservation d'énergie est l'ordonnancement des nœuds (Commutation entre les périodes actives/passives). Ce changement d'état doit préserver une propriété très importante qui est la couverture de la surface.

La couverture de surface est considérée comme une métrique d'évaluation de performance du réseau [S. Saro and W. B, 2009]. De nombreux travaux ont été réalisés dans ce contexte afin de répondre à la question critique : *comment surveillez efficacement, en termes de surface et d'énergie dépensée, dans une zone déterminée ?*

On sait très bien qu'un nœud capteur permet de surveiller une zone d'intérêt appelé zone de couverture. La zone de couverture est souvent considérée comme un disque de rayon R_s appelé rayon de surveillance. Un nœud est capable de détecter n'importe quel événement qui se passe dans sa zone de couverture. D'un autre côté, la vision d'un capteur dépend du rayon de communication du nœud R_c la figure 1.7 montre les différents rayons associés au nœud capteur. [Abdallah Makhoul ., 2008].

Beaucoup de travaux traitent le problème de la couverture, parmi ces travaux on trouve la K-couverture ou la couverture multiple [Antoine G et al., 2007]. Une zone est dite k-couverte s'il existe k ensembles disjoints de nœuds actifs. Chaque ensemble couvre la zone une fois. Généralement ces travaux tiennent en compte la contrainte suivante :

- Si $R_c \geq 2R_s$ on dit que la surface est couverte.

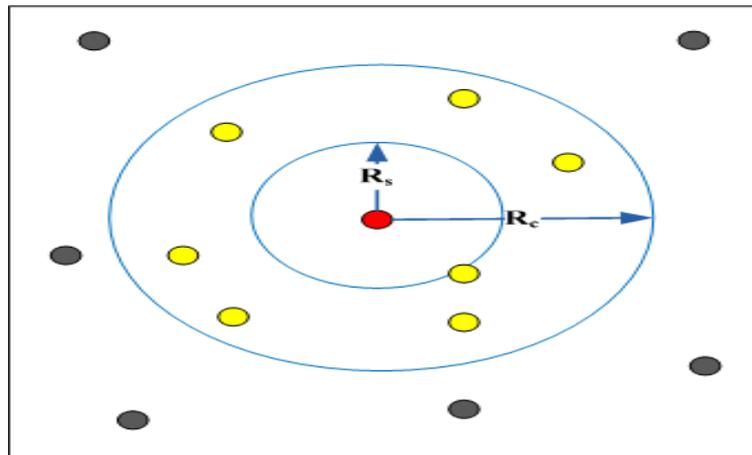


FIG 1.7 – Zone de couverture et zone de communication pour un nœud capteur [Abdallah Makhoul ., 2008]

1.9.3 La connectivité

La connectivité est un problème majeur dans les réseaux de capteurs. Un réseau de capteurs est dit connecté s'il existe, au moins, une route entre chaque paire de nœud [Rabah Meraihi, 2005].

La connectivité dépend essentiellement de l'existence des routes. Elle est affectée par les changements de topologie dus à la mobilité, la défaillance des nœuds, les attaques, etc... ce qui engendre la perte des liens de communication, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, etc.

Bien comprendre la connectivité d'un réseau permet d'adapter les mécanismes de communication afin d'assurer le bon fonctionnement des applications. Ainsi, la découverte du voisinage d'un nœud capteur est un élément important. Dans leur activité périodique, les pertes de connectivité sont principalement dues à la mobilité des nœuds et aussi aux mécanismes liés à l'économie d'énergie. La densité élevée des nœuds dans les réseaux de capteurs les empêche d'être complètement isolés les uns des autres. Par conséquent, il est indispensable que les nœuds de capteurs soient fortement connectés.

1.9.4 La tolérance aux pannes

La défaillance de certains nœuds capteurs dans un réseau de capteurs sans fil peut être causée par plusieurs facteurs, notamment l'épuisement d'énergie, l'endommagement physique, ou

aussi à cause des interférences liées à l'environnement. La tolérance aux pannes désigne l'habilité du réseau à maintenir ses fonctionnalités malgré les interruptions provoquées par la panne des capteurs. Elle vise à minimiser l'influence de ces défaillances sur le fonctionnement global du réseau [I.F.Akyildiz et al., 2002] .

1.9.5 Le passage à l'échelle (l'extensibilité)

Selon le type et le domaine d'application, les nœuds déployés dans un réseau de capteurs peuvent atteindre des milliers de nœuds de capteurs. Ce nombre peut aussi augmenter jusqu'à des millions de capteurs si l'application l'exige. Dans ce cas, le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Il est à noter aussi qu'un réseau très dense engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues [I. Akyildiz et al., 2002]. Par ailleurs, la densité du réseau doit être exploitée pour assurer le bon fonctionnement du réseau.

1.9.6 La topologie dynamique

La topologie d'un réseau de capteurs peut changer au cours du temps. Cette dynamique du réseau découle des défaillances des nœuds à cause d'un endommagement physique ou l'expiration de son énergie. Cela peut engendrer des cassures de liens entre les nœuds capteurs. Par ailleurs, le réseau de capteurs peut avoir une forte dynamique quand les nœuds du réseau sont mobiles. La moindre défaillance d'un capteur peut changer significativement la topologie du réseau nécessitant ainsi une réorganisation coûteuse de ce dernier. Il est connu que la plupart des réseaux de capteurs sans fil sont des réseaux denses. Pourtant, la mobilité et les défaillances font varier la topologie du réseau. Donc la connexité n'est pas toujours assurée. [Abdallah Makhoul ., 2008]

1.9.7 La bande passante limitée

Les réseaux de capteurs sont caractérisés par leurs bandes passantes limitées. Les nœuds capteurs utilisent un débit faible de quelques dizaines de Kb/s pour minimiser l'énergie consommée lors du transfert de données entre eux. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

1.9.8 Agrégation de données

Dans les réseaux de capteurs, la problématique principale concerne la consommation d'énergie : en effet, ces derniers doivent restés opérationnels le plus longtemps possibles, dans des conditions parfois difficiles. La transmission des données d'un capteur est la tâche la plus consommatrice en énergie elle représente environ 70% de sa consommation d'énergie totale (la transmission d'un seul bit consomme l'énergie nécessaire à l'exécution d'environ 1000 instructions) [C.Y and S.P, 2003]. Il est donc nécessaire de minimiser le nombre de bits à transmettre. De plus, les réseaux de capteurs étant assez denses en général, cela signifie que des nœuds assez proches en terme de distance (voisins) peuvent capter les mêmes données (par exemple température, pression et humidité) et donc il apparaît nécessaire d'introduire le mécanisme d'agrégation de données afin d'éviter la duplication d'information au sein du réseau de capteurs et donc minimiser la transmission des données inutiles. Ainsi, les nœuds capteurs préservent leurs énergies et la durée de vie du réseau sera augmentée.

1.11 Comparaison entre les réseaux Ad hoc classiques et les réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil sont apparentés aux réseaux ad hoc. En effet, ces deux types de réseaux ont de nombreux points communs. La ressemblance que nous pouvons remarquer immédiatement est que les deux sont des réseaux sans fil distribués avec une infrastructure pas toujours bien définie. Des chercheurs dans le domaine des MANET se sont consacrés à cette ressemblance, mais aussi à d'autres similarités comme la limitation d'énergie, de mémoire et de capacité de calcul. Ils essaient d'apporter leur savoir-faire et d'adapter aux RCSF (Réseaux de Capteurs Sans Fil) les algorithmes, protocoles et techniques dédiés initialement aux MANET [Ismail M, 2013]. Cependant, Ces deux classes de réseaux sans fil se différencient sur plusieurs aspects, nous citons [Ismail M, 2013][I.F.Akyildiz et al., 2002] :

- Les nœuds dans un réseau MANET interagissent directement avec les êtres humains. Ces nœuds peuvent être des ordinateurs portables, terminaux mobiles, téléphones, etc... tandis que dans les réseaux de capteurs, les nœuds du réseau ce sont des capteurs qui interagissent généralement avec l'environnement. Ils récoltent des mesures sur l'environnement qui les entoure.

- Les réseaux de capteurs sont connus comme étant des réseaux denses contrairement aux réseaux Ad hoc.
- Le déploiement d'un RCSF pourra être critique lorsque les zones sont vastes et parfois hostiles. Les nœuds capteurs deviennent alors fragiles et assez vulnérables à diverses formes de défaillance : physique, épuisement d'énergie, etc...
- Les réseaux de capteurs utilisent principalement le paradigme de diffusion pour la communication des données (broadcast) tandis que les réseaux ad hoc sont basés sur le paradigme de communication point-à point.
- La topologie des réseaux de capteurs change très fréquemment à cause des pannes des nœuds ou à la mobilité.
- Dans les réseaux de capteurs les nœuds collaborent pour atteindre un objectif commun, tandis que dans les réseaux MANET (*Mobile ad hoc networks*) chaque nœud à son propre objectif
- Les capteurs sont limités en énergie, capacités de calcul, et mémoire.
- Les nœuds capteurs ne possèdent aucune identification (ID) globale tel que les adresses IP dans les réseaux Ad Hoc
- Dans les applications des réseaux de capteurs, les nœuds capteurs observent des phénomènes puis envoient les données observées vers une station de base (modèle de communication *many-to-one*). Alors que dans un réseau MANET les applications sont plutôt orientées calcul distribué et donc le trafic circule entre tous les nœuds du réseau et dans tous les sens (modèle de communication *any-to-any*).
- Dans les réseaux Ad hoc traditionnels, les protocoles développés, pour assurer la communication entre les nœuds, visent l'optimisation des différents paramètres de qualité de service (*QoS*) tels que l'efficacité dans le débit et les délais de transmission sous la contrainte de mobilité. La consommation d'énergie est d'une importance secondaire dans ce type de réseaux vu que les batteries des unités mobiles peuvent être facilement remplacées. Tandis que les protocoles développés pour les réseaux de capteurs visent à prolonger la durée de vie des batteries afin de prévenir les dégradations de connectivité dans le réseau, puisque les nœuds capteurs possèdent des sources d'énergie limitées et irremplaçables à cause de leur utilisation distante non-assistée dans les environnements hostiles.

Nous résumons les principales différences dans le tableau suivant :

Réseaux Ad-Hoc Classiques	Réseaux de capteurs
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mobile, portable... ➤ Génériques ➤ Chaque nœud à son propre objectif ➤ Flot de données any- to- any ➤ Communication point à point ➤ La qualité de service est majeure ➤ Mobilité ➤ Aucun nœud central 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Petits capteurs ➤ Objectifs ciblés ➤ Nœuds collaborent pour atteindre un objectif Commun ➤ Flot de données Many –to- one ➤ Utilisation du broadcast ➤ Energie est un facteur déterminant ➤ Mobilité faible ➤ Station de base (coordination)

TAB.1.1 – Comparaison entre les réseaux Ad-Hoc classiques et les réseaux de capteurs

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude sur les réseaux de capteurs sans fil. Nous avons posé les briques de base et fédéré les concepts nécessaires à la compréhension des problématiques abordées dans le reste de ce manuscrit. Parmi ces concepts, nous avons vu les contraintes associées aux réseaux de capteurs. Nous avons remarqué à travers nos lectures que la contrainte d'énergie est le cheval de bataille pour la conception de tout type de protocole lié aux réseaux de capteurs sans fil. En effet, l'aspect énergie est une métrique de performance très importante. Nous avons évoqué aussi le concept de réseaux de capteurs mobiles, ce type de réseau n'est pas largement étudié dans la littérature comparant à son prédécesseur, les réseaux de capteurs statiques. Ces deux concepts, l'énergie et la mobilité vont être des concepts clé pour le reste de ce document.

Chapitre 2

Les réseaux de capteurs mobiles

2.1 Introduction

Les réseaux de capteurs mobiles (MWSNs pour Mobile wireless sensor networks) sont une petite société émergente dans le domaine de la recherche à la différence de son prédécesseur, bien établie, le réseau de capteurs statiques. A notre connaissance, la majorité des recherches existantes considèrent des réseaux de capteurs statiques. Un réseau de capteurs est constitué d'un ensemble de nœuds déployés dans une zone géographique (zone d'intérêt) dans le but de surveiller, et de transmettre les informations à la station de base. Un réseau de capteurs statiques ne considère aucune mobilité des nœuds, ni de la station de base, ni de la zone d'intérêt. Dans ce cas, les capteurs sont regroupés pour capter un phénomène physique (exemple la température) dans une région déterminée. Cela exige une mise en place initiale des infrastructures de communication afin de créer le chemin entre la station de base et les nœuds capteurs.

D'autre part, un réseau de capteurs sans fil mobiles (MWSNs) peut être simplement défini comme un réseau de capteurs sans fil (WSN) dans lequel les nœuds de capteurs sont mobiles, Les nœuds peuvent être mobiles en les attachant à un robot, à un être humain, à un animal, véhicule, etc., selon leur domaine d'application. Par exemple dans les applications militaires, les nœuds peuvent être attachés à des soldats ou des camions, ou bien dans d'autres cas, dans les applications de surveillance de l'habitat écologique, ils peuvent être attachés à des animaux pour suivre leurs mouvements.

MWSNs sont beaucoup plus polyvalents que les réseaux de capteurs statiques, car ils peuvent être déployés dans n'importe quel scénario et faire face aux changements rapides de la topologie. Ils peuvent exploiter la mobilité des nœuds pour recueillir le maximum d'informations sur l'environnement. En outre, les nœuds mobiles se déplacent dynamiquement en s'adaptant ainsi à l'évolution de l'environnement.

Dans ce présent chapitre, nous explorons les différentes architectures proposées pour les réseaux de capteurs mobiles. Nous discutons également des modèles de mobilité existants pour ces derniers. Nous présentons aussi les problèmes rencontrés par ce type de réseau. Et nous terminons par quelques applications proposées pour les réseaux de capteurs mobiles.

2.2 Les problèmes rencontrés par les réseaux de capteurs statiques

Au cours de ces dernières années, une grande quantité d'applications liées aux réseaux de capteurs tels que le suivi des objets, la surveillance médicale, et le transport intelligent ont été proposés. Un réseau de capteurs sans fil est généralement déployé avec des nœuds de capteurs statiques pour effectuer des missions de surveillance dans la région d'intérêt. Toutefois, en raison de l'évolution dynamique des événements et l'hostilité de l'environnement, un réseau de capteurs purement statiques pourrait faire face à de nombreux problèmes cités dans ce qui suit [Javad et al., 2012]:

1. le déploiement initial du réseau ne garantit pas une bonne couverture de la zone d'intérêt et aussi ne garantit pas une bonne connectivité dans l'ensemble du réseau. Souvent les capteurs sont dispersés dans une zone hostile par avion ou en utilisant des robots, [S. S. Dhillon and K. Chakrabarty, 2003]. Cependant ce déploiement aléatoire des capteurs ne peut pas garantir la couverture de toute la zone surveillée et aussi peut résulter en un ensemble de sous réseaux déconnectés, même si un nombre important de nœuds est déployés. En outre, les changements dynamiques de la région d'intérêt et aussi l'existence d'obstacles rendent ce problème plus difficile à gérer.
2. Les capteurs sont alimentés par des batteries limitées en énergie. Quand certains nœuds meurent à cause de l'épuisement de leurs batteries, une perte de la couverture peut être induite. Aussi la mort d'un ou plusieurs capteurs peut affecter la connectivité du réseau. Cependant, dans beaucoup de scénario il est pratiquement impossible de recharger ou de remplacer ces nœuds par de nouveaux nœuds.

3. Un réseau de capteurs peut prendre en charge plusieurs missions dans diverses conditions [G. Cao et al., 2006]. Par exemple, dans une application de suivi d'objet, un nombre suffisant de nœuds de capteurs doit être déployé le long de la piste de l'objet à suivre, tandis que dans une mission de détection dans une zone limitée il devrait y avoir des nœuds adéquats le long du périmètre prédéfini. Ces différentes exigences ne peuvent pas être satisfaites par le déploiement d'un grand nombre de nœuds de capteurs, étant donné que l'approvisionnement pour toutes les combinaisons possibles des exigences de la mission pourrait ne pas être rentable.
4. Quelques applications des réseaux de capteurs sans fil peuvent nécessiter des capteurs sophistiqués (des capteurs coûteux). Par exemple dans les applications militaires, des capteurs de pression peuvent être déployés le long d'une frontière pour détecter une intrusion de l'ennemi. Toutefois, ces capteurs ne peuvent rapporter que quelques informations, ils ne peuvent pas décrire ce qui se passe réellement. Dans ce cas, des dispositifs de détection plus sophistiqués comme les caméras devraient être utilisés pour obtenir plus d'informations. Néanmoins, il est impossible d'équiper chaque nœud par une caméra du fait qu'ils sont nombreux.

En introduisant la mobilité à certains ou à tous les nœuds d'un réseau de capteurs, nous pouvons améliorer la capacité et la flexibilité du réseau en prenant en charge plusieurs missions et aussi traiter les problèmes mentionnés ci-dessus. Le réseau de capteurs est considéré comme un réseau ad hoc dans lequel les nœuds sont étendus avec des capacités de détection.

Un réseau de capteurs mobiles et un réseau ad hoc mobile (MANET) sont différents. En fait, la mobilité dans un réseau MANET est souvent arbitraire, alors que la mobilité dans un réseau de capteurs mobiles devrait être «intentionnelle». En d'autres termes, dans certaines applications, nous pouvons contrôler le mouvement des capteurs mobiles pour effectuer des missions différentes. Cependant, il existe des réseaux de capteurs mobiles avec une mobilité arbitraire.

2.3 Architectures des réseaux de capteurs mobiles

Les réseaux de capteurs mobiles peuvent être classés en une architecture à une, deux, ou trois couches [S.A. Munir, 2007] [Javad et al., 2012].

- Architecture à une couche

Le réseau comprend un ensemble de dispositifs hétérogènes qui communiquent d'une manière ad hoc. Les dispositifs peuvent être mobiles ou fixes, mais communiquent tous sur le même réseau. A titre d'exemple les systèmes de navigation de base, tel que le système de localisation et de navigation décrit dans [I. Amundson, 2008] a une architecture à une couche. Cette architecture est montrée dans la figure 2.1.

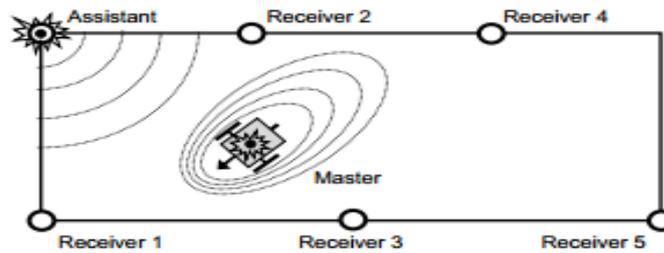


FIG.2.1 – L'architecture du système de navigation et de localisation [I.Amundson,2008]

La région de détection est constituée d'un ensemble de nœuds récepteurs placés à des positions connues, aussi d'un nœud émetteur assistant fixe. Le nœud mobile, également désigné sous le nom d'émetteur maître, se déplace autour de la zone de détection, comme montré dans la figure ci-dessus.

- Architecture à deux couches

Cette architecture consiste en un ensemble de nœuds stationnaires et un ensemble de nœuds mobiles. Les nœuds mobiles forment un réseau superposé ou agissent comme des mules de données pour transférer les données dans le réseau. Le réseau superposé peut inclure les appareils mobiles qui ont la plus grande capacité de traitement, la plus grande portée de communication, et une large bande passante.

En outre, la densité du réseau superposé doit être de telle sorte que tous les nœuds seront connectés en permanence, sinon le réseau peut devenir disjoint. Quand le réseau est disjoint, les entités mobiles peuvent se positionner dans le but de rétablir la connectivité et assurer que les paquets de données atteignent leurs destinations. Le système NavMote [L. Fang, 2005] utilise cette architecture.

- Architecture à trois couches

Dans cette architecture, un ensemble de nœuds de capteurs fixes passe les données à un ensemble de nœuds mobiles, qui ensuite transmettent ces données à un ensemble de points d'accès.

Ce réseau hétérogène est conçu pour couvrir de larges zones et être compatible, simultanément, avec plusieurs types d'applications. Prenons par exemple une application de réseau de capteurs qui surveille un parking pour savoir s'il y'a un espace disponible pour le stationnement. Le réseau de capteurs (première couche) diffuse la mise à jour des données de disponibilité aux dispositifs mobiles compatibles (deuxième couche) tel que les téléphones portables ou PDA qui sont de passage. À son tour, le téléphone portable et/ou PDA transmet les données de disponibilités aux points d'accès (troisième couche) tel que les tours cellulaires. Par la suite, les données sont téléchargées dans un serveur de base de données centralisé. Les utilisateurs qui souhaitent trouver un espace de stationnement disponible peuvent alors accéder à la base de données.

La figure 2.2 montre ces trois architectures.

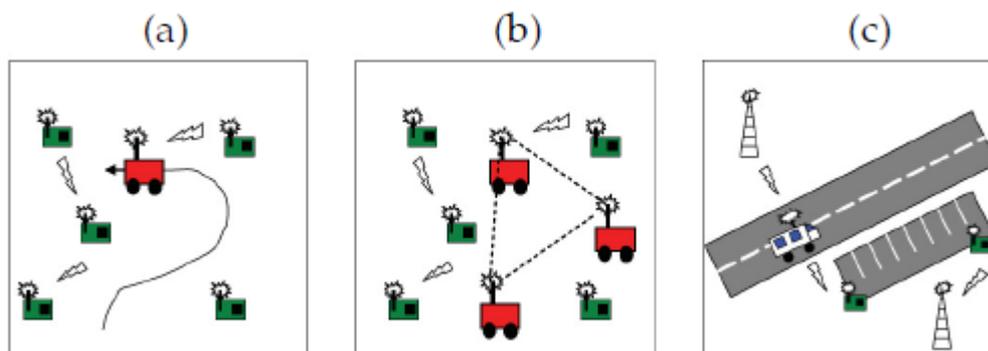


FIG.2.2 – Les différentes architectures d'un réseau de capteurs mobiles : (a) plane, (b) deux couches et (c) trois couches [Javad et al., 2012]

2.4 Les différents rôles des nœuds dans un réseau de capteurs mobiles

Les réseaux de capteurs peuvent être caractérisés selon les rôles des nœuds dans le réseau [Javad et al., 2012] :

- **Capteurs mobiles embarqués** : les nœuds mobiles embarqués ne contrôlent pas leurs propres mouvements, mais plutôt leur mouvement est contrôlé par des forces extérieures.

Par exemple : quand ils sont attachés à un animal [P. Juang et al., 2002] ou à un conteneur [B. Kus'y et al., 2007].

- **Les capteurs actionneurs mobiles** : les nœuds capteurs peuvent aussi avoir des capacités locomotives [K. Dantu et al., 2005], qui leur permettent de bouger dans la région d'intérêt. Avec cette mobilité contrôlée, le déploiement du réseau peut se faire d'une manière exacte. Ainsi la couverture du réseau peut être maximisée et les phénomènes spécifiques peuvent être surveillés et suivis.
- **Les mules de données** : souvent, les nœuds capteurs ne peuvent pas être mobiles, mais ils nécessitent des diapositives mobiles qui seront chargés de la collecte de leurs données et les ramener à la station de base. Ces entités mobiles sont appelées les mules de données [R. Shah et al., 2003]. Les mules de données n'ont pas généralement de contraintes énergétiques, ils peuvent recharger leurs batteries automatiquement.
- **Points d'accès** : Dans les réseaux clairsemés, ou quand un nœud tombe en panne dans le réseau, les nœuds mobiles peuvent se positionner pour maintenir la connectivité du réseau [G. Wang et al., 2005]. Dans ce cas là ils se comportent comme des points d'accès.

2.5 Modèles de mobilité pour les réseaux sans fil mobiles

Dans les réseaux de capteurs mobiles, les nœuds se déplacent d'une manière qui se diffère d'une application à une autre. Afin de simuler les schémas de déplacement des nœuds de capteurs mobiles, les modèles de mobilité sont utilisés. Comme indiqué dans [T. Camp et al., 2002], il est important de considérer le modèle de mobilité adapté à l'application.

Il existe deux types de modèles de mobilités [VASANTHI.V et al., 2011] :

1. **Modèles de mobilité entité / individuels** : dans ce type de mobilité, les mouvements des nœuds sont indépendants les uns des autres, tels que les modèles point de cheminement aléatoire (*Random Waypoint*), direction aléatoire (*Random direction*), marche aléatoire (*Random Walk*).
2. **Modèles de mobilité de groupe**: dans ce type de modèle les nœuds mobiles se déplacent dépendant les uns des autres comme les modèles : modèle du point de référence (Reference Point Group Mobility model), colonne, nomade, continue (pursue) et exponentielle corrélée. Le modèle de chemin (pathway), Manhattan, obstacle sont sous le modèle géographique restreint. La figure 2.3, montre la classification de ces modèles.

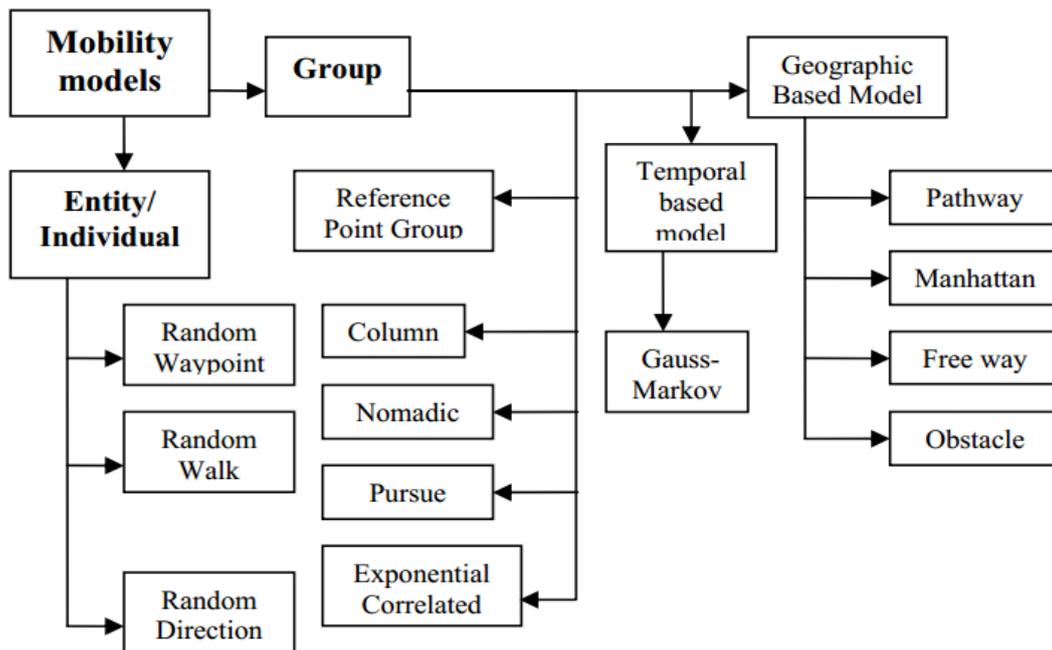


FIG.2.3 – Classification des modèles de mobilité [VASANTHI.V et al., 2011]

2.5.1 Le modèle de point de cheminement aléatoire (*Random Waypoint*)

Il s'agit d'un modèle très simple [Bhavyesh et al., 2007] conçu en se basant sur un temps de pause entre le changement de direction/vitesse. Un nœud mobile (MN) reste dans une position pendant une certaine période de temps (un temps de pause), puis MN choisit une destination aléatoire (x, y) dans la zone de simulation avec des paramètres tels que la vitesse entre $[0, V_{max}]$, temps de pause entre $[P_{min}, P_{max}]$ qui sont répartis uniformément. Le MN se déplace alors vers la nouvelle destination choisie avec la vitesse sélectionnée. À son arrivée, le MN fait une pause pendant une période de temps spécifiée avant de recommencer de nouveau le processus. Les valeurs des temps de pauses et des vitesses sont pertinentes. Quand les nœuds sont rapides et la durée des pauses est longue le réseau sera plus stable que dans la situation des nœuds lent et le temps de pause petit.

Le problème avec ce type de mobilité est que les nœuds sont plus susceptibles d'être dans la partie centrale de la topologie plutôt que d'être près des limites [Bhavyesh et al., 2007]. Même si le modèle point de cheminement aléatoire est couramment utilisé dans des études de simulation, une compréhension fondamentale de ces caractéristiques théoriques fait encore défaut. Actuellement, les chercheurs étudient ses propriétés stochastiques, tels que la distribution de probabilité de la longueur de transition et le temps de transition pour chaque

époque. Ce modèle est un processus de mobilité sans mémoire où les informations sur l'état précédent ne sont pas utilisées pour les décisions futures. C'est-à-dire, la vitesse courante est indépendante de la vitesse précédente et la vitesse future est également indépendante de la vitesse actuelle. La figure 2.4 montre le mouvement du nœud dans le modèle de mobilité de point de cheminement aléatoire.

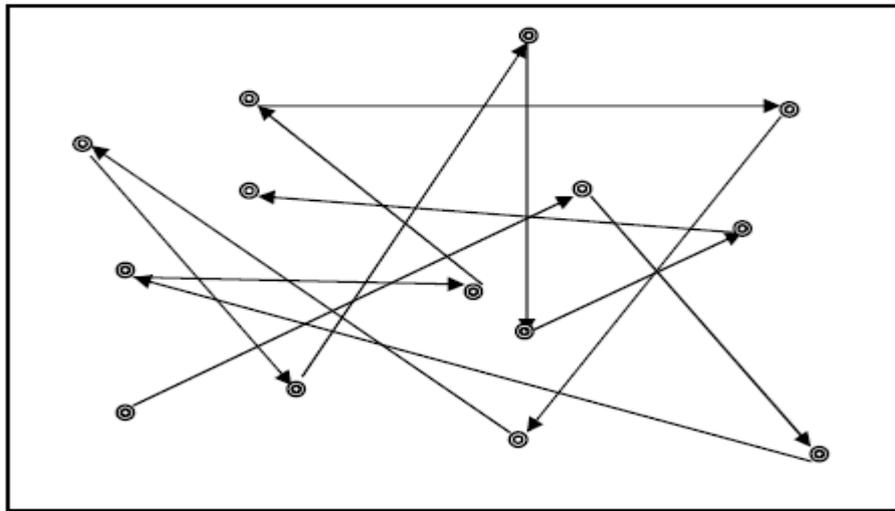


FIG.2.4 – Le mouvement d'un nœud utilisant le modèle de mobilité de point de cheminement aléatoire [Bhavyesh et al., 2007].

2.5.2 Modèle de mobilité marche/direction aléatoire (Random Walk/ Random Direction)

Le modèle de marche aléatoire a été initialement proposé pour imiter le mouvement imprévisible des particules en physique. Il est aussi appelé le mouvement brownien. Vu que certains nœuds mobiles sont censés se déplacer d'une manière inattendue, le modèle de mobilité de marche aléatoire est proposé pour imiter leur comportement de déplacement [T. Camp et al., 2002]. Ce modèle présente des similitudes avec le modèle de point de cheminement aléatoire parce que le mouvement des nœuds est aléatoire dans les deux modèles. Nous pouvons penser que le modèle de marche aléatoire est comme le modèle point de cheminement aléatoire spécifique avec temps de pause zéro. Cependant, dans le modèle de marche aléatoire, les nœuds changent de vitesse, et de direction à chaque intervalle de temps. Pour chaque nouvel intervalle t , chaque nœud choisit aléatoirement et uniformément sa nouvelle direction $\theta(t)$ de $(0, 2\pi]$. De façon similaire, la nouvelle vitesse suit une distribution uniforme ou une distribution gaussienne de $[0, V_{\max}]$. Par conséquent, pendant l'intervalle de temps t , le nœud se déplace avec le vecteur de vitesse $v(t) \cos\theta(t)$, $v(t) \sin\theta(t)$.

Si le nœud se déplace selon les règles ci-dessus et atteint la limite de la zone de simulation, le nœud est renvoyé à la zone de la simulation avec un angle de $\theta(t)$ ou $\pi - \theta(t)$, respectivement. Le modèle de marche aléatoire est un processus de mobilité sans mémoire où les informations sur l'état précédent ne sont pas utilisées pour la décision future. Cependant, on observe que ce n'est pas le cas des nœuds mobiles dans les nombreuses applications de la vie réelle.

2.5.3 Modèle de mobilité Manhattan

Le modèle de mobilité Manhattan [Shafinaz et al., 2007] utilise une topologie de réseau routier. Ce modèle est principalement proposé pour le mouvement dans les zones urbaines, où les rues sont organisées et les nœuds mobiles peuvent se déplacer seulement dans des directions horizontales ou verticales. A chaque intersection d'une rue horizontale et une rue verticale, le nœud mobile peut tourner à gauche, à droite ou aller tout droit avec une certaine probabilité. Les relations inter-nœud et intra-nœud impliquées dans le modèle Manhattan sont très similaires au modèle de mobilité d'autoroute (Freeway). Ce modèle peut être utilisé dans les simulateurs de réseaux mobiles ad hoc (MANET) et les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANET¹). La figure 2.5 montre un échantillon de mouvement des nœuds utilisant le modèle Manhattan avec dix-sept nœuds. La carte définit les routes où les nœuds peuvent se déplacer.

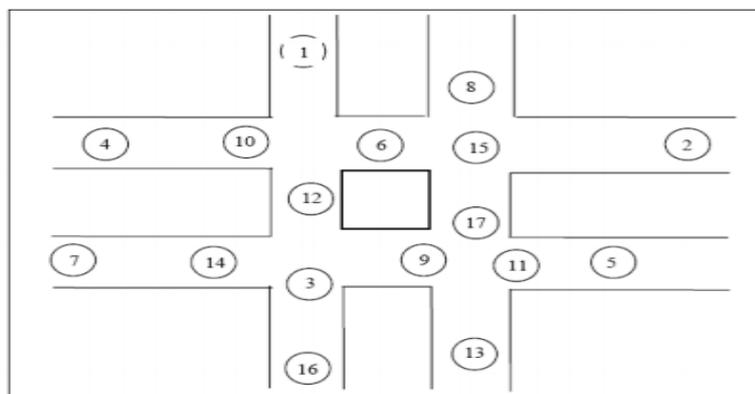


FIG.2.5 – Topographie montrant les mouvements des nœuds sous le modèle Manhattan [Shafinaz et al., 2007].

2.5.4. Le modèle Gauss-Markov

Dans le modèle de mobilité de Gauss-Markov chaque nœud mobile est initié avec une vitesse et une direction. La vitesse et la direction de chaque nœud sont mises à jour à des intervalles

¹ Dans un VANET (Vehicular Ad-hoc NETWORK), les nœuds du réseau ad hoc sont des véhicules roulant sur une route ou une autoroute. Il s'agit d'un réseau ad hoc dit fortement mobile

de temps fixes. En fait, la valeur de la vitesse et de la direction à l'instant n sont calculées en fonction de la valeur de la vitesse et de la direction à l'instant $n - 1$. Camp et al [VASANTHI.V et al., 2011] élaborent les formules permettant de calculer la vitesse et la direction dans les détails.

Figure 2.6 montre le mouvement d'un nœud dans le modèle Gauss-Markov.

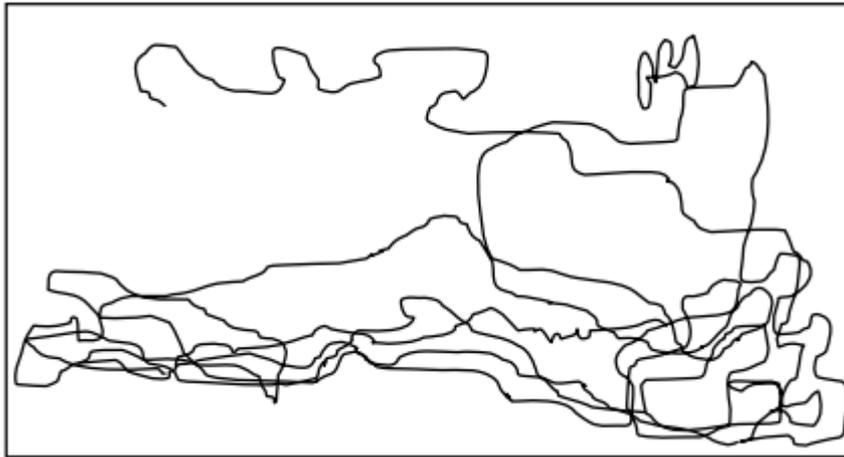


FIG.2.6 – Modèle de mobilité Gauss-Markov [Javad et al., 2012]

2.5.5 Le Modèle d'autoroute (FreeWay- FW)

Le modèle FW [J. Tian et al.,2002] émule le comportement du mouvement des nœuds mobiles sur une autoroute. Il peut être très bien utilisé dans l'échange de l'état du trafic ou le suivi d'un véhicule sur une autoroute. Ce modèle utilise des cartes, et sur la carte on trouve plusieurs autoroutes à deux voies dans les deux sens. Chaque nœud mobile est limité à sa voie de circulation sur l'autoroute. La vitesse du nœud mobile est temporellement dépendante de sa vitesse précédente. Si deux nœuds mobiles sont sur la même voie de l'autoroute et s'ils sont à distance de sécurité (SD), la vitesse du nœud suivant ne peut pas dépasser la vitesse du nœud précédent.

La figure 2.7 montre les mouvements des nœuds dans le modèle d'autoroute avec douze nœuds. Les nœuds qui se déplacent dans une ligne ne peuvent pas passer à une autre ligne.

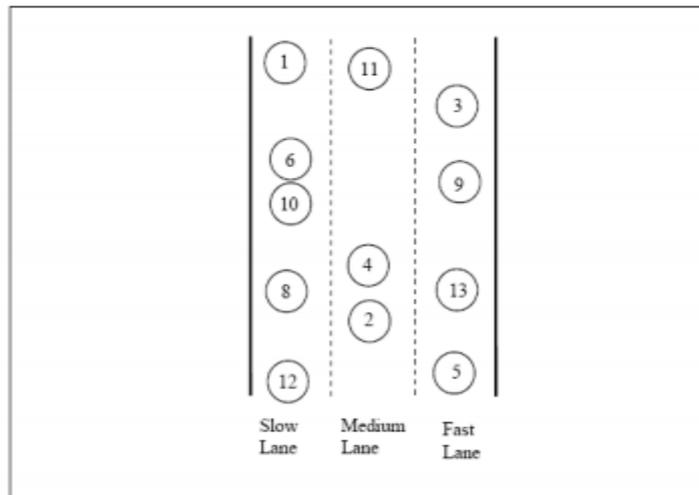


FIG.2.7 – Le mouvement des nœuds dans le modèle de mobilité d'autoroute [VASANTHI.V et al., 2011]

2.5.6 Modèle de mobilité de point de référence (RPGM)

Ce modèle présente la dépendance spatiale [Geetha et al., 2008]. Il se compose de groupes de nœuds qui travaillent en collaboration. Chaque groupe a un chef de groupe et des nœuds membres, le mouvement du chef de groupe détermine le mouvement de l'ensemble du groupe.

Le mouvement du chef de groupe à l'instant t est représenté par le vecteur V_t , chaque membre de ce groupe s'écarte de ce vecteur de mouvement général V_t avec un certain degré. Pour chaque nœud, la mobilité est affectée avec un point de référence qui suit le mouvement du groupe. Cette description générale de la mobilité de groupe peut être utilisée pour créer une variété de modèles pour différents types d'applications mobiles telles que les conférences, les réunions, les équipes d'urgence, les équipes de secours, les divisions/pelotons militaires. Il est utilisé comme méthode générique pour la manipulation de la mobilité de groupe. Les paramètres d'entrée du modèle de RPGM offrent une souplesse pour mettre en œuvre les modèles de mobilité : Colonne, Nomade, Communauté, et Continue. La figure 2.8 illustre le mouvement d'un groupe de trois nœuds mobiles dans un modèle RPGM. A partir de la figure, les nœuds individuels se déplacent de manière aléatoire suivant leurs propres points de références prédéfinis, le mouvement des nœuds dépend à son tour du mouvement du groupe. Le mouvement du groupe est basé sur la trajectoire parcourue par le centre logique du groupe.

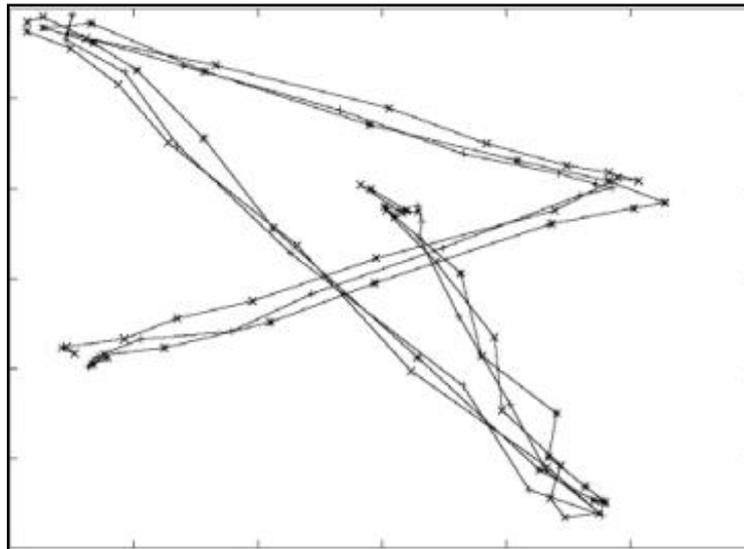


FIG.2.8 – Motif de mouvement de trois nœuds utilisant le modèle RPGM [VASANTHI.V et al., 2011]

Hong, Gerla, Pai et Chiang montrent que le modèle RPGM est capable de représenter divers scénarios de mobilité, y compris [VASANTHI.V et al., 2011] :

- **Le modèle de mobilité sur-place (In-place)** : dans ce modèle toute la zone est divisée en plusieurs régions adjacentes. Chaque région est occupée exclusivement par un seul groupe.
- **Le modèle de mobilité de chevauchement** : dans ce modèle différents groupes avec des tâches différentes se déplacent sur le même terrain en se chevauchant.
- **Le modèle de mobilité de convention** : Ce scénario est pour émuler la mobilité dans les conférences. La région est divisée également en plusieurs régions, alors que certains groupes sont autorisés à se déplacer entre les régions.

2.5.7 Modèle de mobilité de la colonne

Le modèle de mobilité de la colonne représente un ensemble de nœuds mobiles (par exemple, des robots) qui se déplacent dans une certaine direction fixe. Ce modèle de mobilité peut être utilisé dans les activités de recherche et d'analyse, telle que la destruction des mines par des robots militaires. Lorsque le nœud mobile est sur le point de se déplacer au-delà de la limite de la zone de simulation, la direction du déplacement est retournée de 180 degrés. Ainsi, le nœud mobile peut se déplacer vers le centre de la zone de simulation dans le nouveau sens.

2.5.8 Modèle de mobilité nomade

Le modèle de mobilité nomade représente des scénarios de mobilité où un groupe de nœuds se déplace ensemble. Ce modèle pourrait être appliqué dans la communication mobile dans une conférence ou une application militaire. L'ensemble des nœuds mobiles du groupe se déplacent aléatoirement d'un emplacement à un autre. Ensuite, le point de référence de chaque nœud est déterminé sur la base du mouvement général de ce groupe. Le mouvement dans le modèle de mobilité nomade est sporadique tandis que le mouvement est plus ou moins constant dans le modèle de mobilité de la colonne.

2.5.9 Modèle de poursuite (Pursue model)

Le modèle de poursuite émule les cas où plusieurs nœuds tentent de capturer un seul nœud mobile qui se trouve en avant. Ce modèle de mobilité peut être utilisé pour la poursuite de cibles et pour les applications des forces de l'ordre. Le nœud poursuivi (nœud cible) se déplace librement selon le modèle aléatoire du point d'acheminement en se dirige vers la position du nœud cible, les nœuds candidats tentent d'intercepter le nœud cible.

2.5.10 Modèle exponentiel corrélé

C'est un modèle de mobilité de groupe qui utilise une fonction de mouvement pour créer les mouvements.

- Modèle du chemin (Pathway)

Un moyen simple d'intégrer les contraintes géographiques dans le modèle de mobilité est de limiter le mouvement du nœud aux chemins de la carte. La carte est prédéfinie dans la zone de simulation. Tian, Hahner et Becker et al. [J. Tian et al., 2002] utilisent un graphe aléatoire pour modéliser la carte de la ville. Ce graphe peut être généré d'une manière aléatoire ou défini avec soin à base d'un plan d'une ville réel. Les sommets du graphe représentent les bâtiments de la ville, et les liens modélisent les rues et les routes entre les bâtiments. Dans un premier temps, les nœuds sont placés de manière aléatoire sur les liens. Ensuite, pour chaque nœud la destination est choisie au hasard et le nœud se déplace vers cette destination en prenant le plus court chemin. À l'arrivée, le nœud prend une pause de période T et choisit une nouvelle fois une destination pour le mouvement suivant. Cette procédure est répétée jusqu'à la fin de la simulation. Contrairement au modèle du point de cheminement aléatoire où les nœuds peuvent se déplacer librement, les nœuds mobiles dans ce modèle ne sont

autorisés à circuler que sur les chemins. Cependant, étant donné que la destination du mouvement est choisie au hasard, un certain degré de caractère aléatoire existe encore pour ce modèle. Ainsi, les nœuds se déplacent d'une manière pseudo-aléatoire sur les chemins. De même, dans le modèle de mobilité d'autoroute et le modèle de mobilité Manhattan [EylemEkici et al., 2006], le mouvement du nœud mobile est également limité aux chemins dans la zone de simulation. Figure 2.9 illustre les cartes utilisées pour les modèles d'autoroute (Freeway), Manhattan et le modèle du chemin (Pathway).

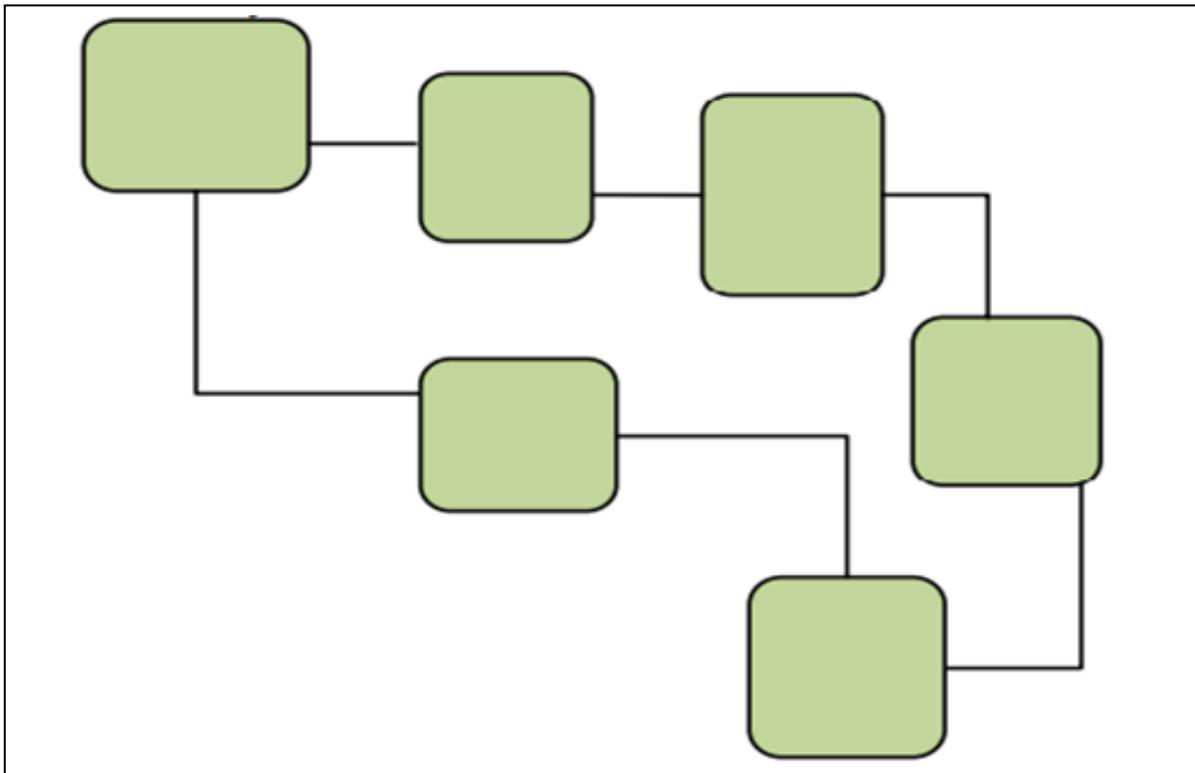


FIG.2.9 – Le graphe utilisé pour les modèles de mobilité d'autoroute, Manhattan et chemin [VASANTHI.V et al., 2011]

- **Modèle de mobilité d'obstacles**

Une autre contrainte géographique qui joue un rôle important dans la modélisation de la mobilité est l'existence des obstacles dans la zone de simulation. Afin d'éviter les obstacles sur le chemin, le nœud mobile doit modifier sa trajectoire. Par conséquent, les obstacles affectent le comportement du déplacement des nœuds mobiles. En outre, les obstacles ont également un impact sur la propagation de la radio. Par exemple, pour l'environnement

intérieur, typiquement, la radio ne peut pas propager le signal à travers les obstacles sans une atténuation sévère.

Johansson, Larsson et Hedman et al [P. Johansson et al., 1999] développent trois scénarios de mobilité réaliste qui représentent le mouvement des utilisateurs mobiles dans la vie réelle, y compris :

- Scénario de conférence : il se compose de 50 personnes assistant à une conférence. La plupart d'entre eux sont statiques et un petit nombre de personnes se déplacent à faible mobilité.
- Scénario de couverture de l'événement : dans ce scénario, un groupe de personnes très mobiles ou des véhicules sont modélisés. Ces nœuds mobiles changent souvent de positions.
- Scénarios de secours en cas de catastrophe : où certains nœuds se déplacent trop vite et d'autres se déplacent très lentement. Jardosh, Belding-Royer et Almeroth et al [A. Jardosh et al., 2003] étudient également l'impact des obstacles sur la modélisation de la mobilité dans les détails. Après avoir examiné les effets d'obstacles sur le modèle de la mobilité, les trajectoires de mouvement et la propagation des ondes radio des nœuds mobiles sont en quelque sorte limités.

2.6 Les avantages de la mobilité

Dans de nombreux déploiements de réseaux de capteurs, une répartition optimale est inconnue jusqu'à ce que les nœuds de capteurs commencent à recueillir et à traiter les données. Avoir un déploiement optimal est souvent impossible sans l'intégration de la mobilité. Dans cette section, quelques avantages de l'ajout de la mobilité sont mentionnés [Javad et al., 2012].

- Une durée de vie plus longue

Le déplacement des capteurs rend la transmission plus dispersée et la gestion de l'énergie dépensée plus efficace. La mobilité permet d'éviter aux nœuds capteurs qui sont près de la passerelle ou la station de base de perdre vite leurs énergies.

Dans les réseaux clairsemé ou disjoints, ou quand un nœud statique meurt, les nœuds mobiles peuvent manœuvrer pour assurer une bonne couverture et une bonne connectivité dans le réseau. Ceci n'est pas possible avec les réseaux de capteurs statiques, dans lequel les données

des nœuds morts ou déconnectés seraient tout simplement perdues. Par ailleurs, lorsque les stations de base du réseau sont stationnaires, les nœuds les plus proches de la station de base épuisent vite leurs énergies, parce qu'ils doivent transmettre plus de messages de données que les nœuds éloignés. En utilisant les stations de base mobiles, ce problème sera éliminé ainsi la durée de vie du réseau sera étendue [S. Gandham et al.,2003].

- **Augmenter la capacité du canal**

Des expériences ont démontré que, si le nombre de puits mobiles augmente linéairement avec le nombre de capteurs, les gains de capacité du canal peuvent être de 3 à 5 fois plus que dans les réseaux de capteurs statiques. La mobilité permet également une plus grande capacité du canal de transmission et permet de maintenir l'intégrité des données en créant de multiples voies de communication. Elle permet aussi de réduire le nombre de saut parcouru par le message de données pour atteindre la destination [A. Kansal et al., 2004].

- **Améliorer la couverture et le ciblage**

Généralement les réseaux de capteurs sont déployés d'une manière aléatoire, au lieu d'être déployé avec précision, ils sont généralement ramener à se déplacer pour une meilleurs couverture, ou pour être plus proche de la cible à surveiller.

Généralement le déploiement du réseau est déterminé par le type d'application, Les nœuds peuvent être placés dans une grille, au hasard, autour d'un objet d'intérêt, etc.

Dans de nombreuses situations, un déploiement optimal est inconnu jusqu'à ce que les nœuds de capteurs commencent la collecte et le traitement des données. Pour les déploiements dans les zones éloignées ou larges le repositionnement des nœuds est généralement irréalisable. Toutefois, lorsque les nœuds sont mobiles, le redéploiement devient possible. En fait, il a été montré [G. Wang et al., 2005] que l'intégration des entités mobiles dans les réseaux de capteurs améliore la couverture et, par conséquent, l'utilité du déploiement des réseaux de capteurs sans fil. Ainsi, Cela permet aux applications de détections de devenir plus polyvalentes [I. Amundson, 2008]. Par exemple, dans une application de surveillance des feux de forêt, les capteurs mobiles sont capables de maintenir une distance de sécurité du périmètre de feu, ainsi ils peuvent fournir des mises à jour pour les pompiers sur l'état de la zone en feu.

- **Améliorer les performances**

La plupart des réseaux Ad hoc peuvent être améliorés sur plusieurs points : la qualité des communications, la réduction du coût global et le temps nécessaire pour compléter une tâche, avoir une meilleure sécurité [J. Capkun et al., 2003], et l'augmentation de la capacité du réseau.

L'aspect de la communication sans fil est de plus en plus important dans les systèmes multi-robots [A. Tiderko et al., 2008] pour améliorer leurs performances globales. Un robot mobile peut avoir besoin des données des autres robots pour décider de son prochain mouvement. Le module de communication ne permet pas seulement la fusion des données recueillies par les robots mobiles, mais contribue également à développer une vue individuelle sur le réseau et l'environnement physique.

- **Une meilleure fidélité des données**

Le dernier avantage peut être obtenu en utilisant un nœud mobile pour transporter des données à un point prédestiné. Il est utile lorsque le canal sans fil est en mauvais état, ou si l'épuisement de l'énergie prématurée est possible (aussi appelé effet d'entonnoir) [J. Li et al., 2007]. La réduction du nombre de sauts dus à la mobilité va augmenter la probabilité d'une transmission réussite.

2.7 Défis majeurs de la mobilité

Afin de se concentrer sur l'aspect de la mobilité des réseaux de capteurs sans fil, il est important de comprendre comment les hypothèses communes concernant les réseaux de capteurs statiques changent lorsque les entités mobiles sont introduites [Javad et al., 2012].

- **La Localisation**

Dans les réseaux de capteurs statiques, la position du nœud peut être déterminée une fois lors du déploiement initial du réseau. Cependant, dans un réseau de capteurs mobiles les nœuds doivent continuellement obtenir leurs positions puisqu'ils se déplacent dans la zone d'intérêt [J. Rezazadeh et al., 2011], ceci exige plus de temps et plus d'énergie, ainsi que la disponibilité d'un service de localisation rapide.

- **Topologie dynamique**

La topologie est dynamique parce que les nœuds, en général, sont mobiles dans les réseaux de capteurs mobiles (MWSNs). Ainsi, de nouveaux protocoles de contrôle d'accès au support (MAC) et des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs mobiles sont nécessaires. Les Protocoles de routage traditionnels conçus pour les réseaux de capteurs statiques (WSN) décrivent la meilleure façon de router les messages à travers le réseau de sorte qu'ils seront plus susceptibles d'atteindre leurs destinations. Ces protocoles s'appuient généralement sur des tables de routage ou sur l'historique récent des itinéraires. Dans les topologies dynamiques, les données de la table deviennent rapidement obsolètes, et la découverte de route doit être réalisée à plusieurs reprises à un coût considérable en termes d'énergie, de temps et de bande passante. Heureusement, il y'a un domaine de recherche actif dédié au routage dans les réseaux mobiles ad hoc (MANET), et les réseaux de capteurs mobiles peuvent emprunter ces travaux.

- **La consommation d'énergie**

Les modèles de consommation d'énergie diffèrent considérablement entre les réseaux de capteurs statiques et les réseaux de capteurs mobiles. Pour les deux types de réseaux, la communication sans fil induit à un coût énergétique important et elle doit être utilisée de manière efficace. Cependant, les entités mobiles nécessitent une énergie supplémentaire pour la mobilité, et ils sont souvent équipés d'une réserve d'énergie beaucoup plus grande, où ils ont la capacité d'auto-chargement qui leurs permet de se brancher dans le réseau électrique pour recharger leurs batteries.

- **Mobilité des puits**

Dans les applications des réseaux de capteurs centralisées, les données sont transmises à une station de base, où elles peuvent être traitées en utilisant des méthodes gourmandes en ressources. Le routage des données et l'agrégation peuvent entraîner une surcharge significative. Certains réseaux de capteurs mobiles utilisent des stations de base mobiles [S. Gandham et al.,2003], qui traversent la région de détection pour recueillir les données, ou se positionnent de façon à ce que le nombre de saut de transmission soit minimisé pour les nœuds de capteurs.

2.8 Quelques Applications des réseaux de capteurs mobiles

L'intégration de la mobilité dans les réseaux de capteurs augmente le nombre d'applications dans différents domaines. Dans ce qui suit nous illustrons deux exemples d'applications des réseaux de capteurs mobiles dans le domaine de la surveillance médicale et la supervision de l'habitat écologique.

2.8.1 La surveillance médicale

Parmi les applications proposées pour la surveillance médicale on trouve le code bleu (*Code Blue* en anglais) [Emeka and Abraham, 2011]. Le Code bleu (*Code Blue*) est un prototype de réseaux de capteurs sans fil pour la surveillance médicale, il définit une architecture matérielle et un Framework logiciel. La conception de l'architecture matérielle permet l'intégration d'un oxymètre de pouls², électrocardiographe (ECG), et carte de capteurs d'analyse de mouvement sur le MicaZ [8] et Telos Motes [9]. Le Framework logiciel fournit des protocoles de découverte d'appareil, une couche de routage, et une interface simple de recherche qui permet aux soignants de demander des données à partir de groupes de patients. La figure 2.10 donne une illustration de l'architecture Code bleu et son mode de fonctionnement.

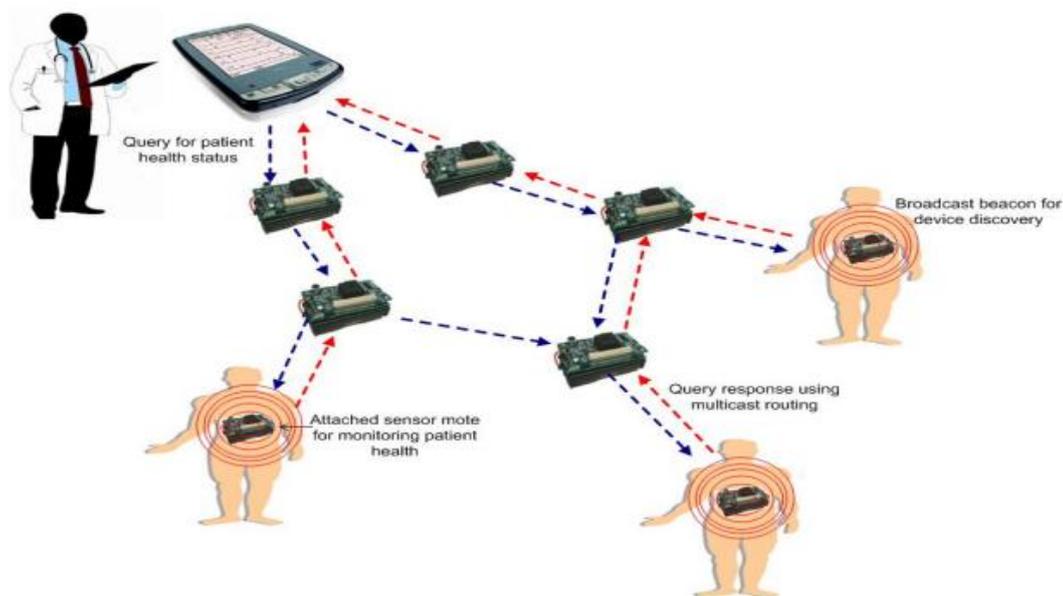


FIG.2.10 – Aperçu sur l'architecture du code bleu et ses opérations [Emeka and Abraham, 2011]

² L'oxymétrie de pouls ou saturation en oxygène est une méthode de mesure non invasive de la saturation en oxygène de l'hémoglobine au niveau des capillaires sanguins, on parle de saturation pulsée en oxygène : SpO2. La SpO2 est très proche de la SaO2, qui est la saturation artérielle en oxygène

Sur la figure 2.10, chaque patient est équipé d'un capteur qui est utilisé pour surveiller son état de santé. Un simple protocole de découverte de dispositif est utilisé pour que les capteurs dans le réseau puissent se découvrir. Plus précisément, chaque nœud diffuse périodiquement son ID (identifiant) et les types de capteurs qu'il supporte sur un canal de diffusion spécifique à l'aide d'une balise de diffusion. Les Dispositifs d'utilisateur final tels que les dispositifs (PDA) exploités par les professionnels médicaux (par exemple, les médecins ou les infirmières), demandent des informations de patients qui sont surveillés par un groupe de capteurs. Ces dispositifs possèdent des capacités de détection biomédicales.

Afin de faciliter les requêtes et le processus de réponse, le protocole de routage multicast TinyADMR [Bor-rong et al, 2006] est utilisé pour établir des routes multicast entre les capteurs émetteurs de données et les dispositifs d'utilisateur final qui souscrivent un intérêt pour ces données. Le but principal de TinyADMR est de fournir des requêtes et des réponses sous un ensemble de contraintes : la mobilité des nœuds, plusieurs chemins simultanés, et un canal de communication sujette aux erreurs.

Pour le mécanisme d'interrogation (l'envoi des requêtes), une interface est conçue pour permettre au dispositif récepteur de demander des données à partir de capteurs biomédicaux spécifiques en se basant sur l'adresse physique du nœud et type de capteur.

Code bleu est également équipé d'un système de localisation à base de RF³ qui est utilisé pour suivre l'emplacement des patients et des soignants, une possibilité qui est particulièrement utile dans les grands établissements hospitaliers.

2.8.2 Pour la surveillance de l'habitat écologique

Parmi les applications proposées pour la supervision de l'habitat écologique, le système Zebranet [P. Juang et al., 2002].

ZebraNet est un projet mené par l'Université de Princeton et déployé dans le centre du Kenya. Il vise à étudier les populations des zèbres en utilisant des capteurs fixés sur les animaux. Le système Zebranet est composé d'un ensemble de colliers. Chaque collier représente un petit capteur contenant une mémoire flash, un petit processeur (CPU), un système de localisation (GPS) et un transducteur sans fil. Le système ZebraNet était conçu pour atteindre les objectifs suivants :

³ Radio Frequency

1. Les positions GPS sont collectées toutes les 3 minutes.
2. Les journaux d'activité détaillés sont pris pour 3 minutes chaque heure.
3. Une année de bon fonctionnement sans l'intervention de l'être humain.
4. Déployer dans une zone très vaste de 100 à 1000 Km².
5. Il n'y a pas de station de base, d'antenne et de service cellulaire fixe.
6. Tandis que la latence n'est pas critique un taux de réussite élevé pour fournir toutes les données enregistrées est important.
7. Le poids des colliers portés par les zèbres est limité entre 3 et 5 lbs⁴ qui valent 1.36 et 2.27 Kg, respectivement. Les petits zèbres peuvent nécessiter des colliers plus légers.

La durée de trois minutes entre la collecte de positions GPS est motivée par les recherches menées par les biologistes. Ils ont trouvé que cet intervalle de temps est suffisamment long pour enregistrer des comportements statistiquement indépendants et aussi suffisant pour enregistrer des données. Par ailleurs, une fois par heure pour une durée de trois minutes, des informations détaillées seront enregistrées. Ces informations détaillées incluent : les différentes estimations de positions, informations sur la température, données météo, données environnementales, le mouvement du corps qui servira de signature de comportement.

Globalement, le but principal de Zebranet est de délivrer aux chercheurs une grande partie des données collectées durant des mois ou des années. Les protocoles conçus pour ce système doivent être économiques en termes d'énergie.

2.9 Conclusion

Beaucoup de recherches ont été effectuées dans le domaine des réseaux de capteurs statiques, cependant vu leurs limites ces derniers demeurent inefficaces pour plusieurs types d'applications. L'intégration de la mobilité dans les réseaux de capteurs mobiles peut améliorer la capacité et la flexibilité du réseau pour prendre en charge plusieurs missions et pour traiter les problèmes associés aux réseaux statiques.

⁴ pound : 1 pound vaut 0.5 kg

La mobilité fait apparaître des problèmes nouveaux par rapport aux réseaux de capteurs fixes comme le changement de topologie, le routage et les conditions de la propagation radio qui sont variables en fonction de la position. Les solutions conçues pour des nœuds fixes ne peuvent pas donc être utilisées directement dans un environnement mobile. Elles engendreraient une consommation d'énergie élevée et une mauvaise qualité de service. De nouvelles solutions doivent être trouvées pour s'adapter aux limitations qui existent, ainsi qu'aux facteurs qui rentrent en jeu lors de la conception. Dans ce chapitre nous avons présenté les architectures proposées pour les réseaux de capteurs mobiles. Nous avons discuté également les modèles de mobilité existantes pour les réseaux de capteurs sans fil et les problèmes rencontrés par ce type de réseau. Et nous avons terminé par la présentation de deux applications proposées pour les réseaux de capteurs mobiles.

Chapitre 3

Les techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

3.1 Introduction

Durant ces dernières décennies, les réseaux de capteurs ont bouleversé le monde. Le besoin d'un suivi continu des phénomènes naturels et aussi la surveillance dans différents domaines, ont renforcé l'intérêt pour cette nouvelle ère de l'informatique embarquée. En revanche, les réseaux de capteurs souffrent de leurs fragilités et de leurs énergies limitées. Les nœuds capteurs sont alimentés par des batteries limités en énergie. Par ailleurs, le remplacement des batteries n'est pas une solution envisageable pour ces derniers, soit à cause du déploiement aléatoire des capteurs, ou à cause de l'hostilité de l'environnement où ils sont placés. Toutefois, la mort d'un ou plusieurs nœuds capteurs interrompt partiellement la communication dans le réseau. De ce fait, une partie des données collectées sera perdue ce qui en résulte à la mort partielle du réseau.

Maximiser la durée de vie du réseau constitue l'un des défis majeur. La maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs revient à minimiser les différentes sources d'énergies. En fait, un nœud capteur consomme de l'énergie pour accomplir son objectif dans le réseau. Son rôle principal est la collecte, le traitement et la transmission d'un ensemble de grandeur physique sur l'environnement qui l'entour. Ces trois opérations constituent les principaux facteurs de consommation d'énergie. A partir de là, réduire l'énergie consommée par un nœud capteur revient à optimiser ces trois tâches. Dans ce contexte, plusieurs techniques de conservation d'énergie ont été proposées dans la littérature. Dans ce présent, nous décrivons la problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Nous présenterons aussi un panorama de techniques de conservations d'énergie proposées dans la littérature.

3.2 Notion de durée de vie du réseau

La durée de vie du réseau dépend fortement de la durée de vie nodale. Cette dernière représente une métrique d'évaluation des performances très importante aussi bien dans les réseaux de capteurs que les réseaux Ad Hoc [Ozan K et al., 2006]. La vie nodale correspond à la durée de vie d'un des nœuds du réseau. Cette durée de vie dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie consommée en fonction du temps et la quantité d'énergie qui lui reste. La durée de vie moyenne \bar{E} d'un nœud continuellement actif est calculée comme suit [Ozan K et al., 2006] :

$$\bar{E} = \frac{E}{P} \quad (3.1)$$

Où : P est la puissance de transmission et E est l'énergie résiduelle du nœud.

Pour la durée de vie du réseau il existe deux définitions principales :

- Pour certains elle représente le temps écoulé jusqu'à qu'un premier nœud tombe en panne [J.Chang and L.Tassiulas, 2000] [I.kang and R.Poovendran, 2003],
- Pour d'autres c'est la durée jusqu'à ce qu'il reste au plus une certaine fraction de nœuds survivants dans le réseau [K.Hellman and M.C, 2006]. Dans la suite de ce manuscrit nous utiliserons la première définition.

3.3 Formes de dissipation d'énergie

Détecter les évènements dans l'environnement capté, élaborer un traitement de données local et rapide, et transmettre les résultats à l'utilisateur sont les principales tâches d'un nœud capteur dans le réseau de capteurs. Les étapes de consommation d'énergie par ce nœud peuvent être, dès lors, divisées en trois phases : le captage, la communication et le traitement des données [W. Heinzelman et al., 2000].

3.3.1 L'énergie de captage

L'unité de détection a pour rôle la collecte de mesures physique de l'environnement surveillé. Cette dernière dépense son énergie dans la réalisation des opérations suivantes [M. Ilyas and I. M, 2005] :

- 1) l'échantillonnage de données et la conversion en un signal électrique,

- 2) le traitement du signal, et
- 3) la conversion du signal de l'analogique au numérique.

La plupart des chercheurs partent de l'idée que l'énergie consommée par l'échantillonnage des données est négligeable comparant à la communication [M. Ilyas and I. M, 2005]. En revanche, dans certain cas, l'énergie dépensée pour l'échantillonnage peut être dans le même ordre de grandeur ou supérieure à l'énergie consommée lors de la communication. A titre d'exemple : l'utilisation d'un capteur gourmand en énergie [Ian F et al., 2007], des capteurs actifs (tels que les sonars, les capteurs d'image) [Maarten D and F.H, 2006] ou aussi dans le cas où le temps d'échantillonnage est long. Par ailleurs, l'énergie consommée au moment du captage varie suivant la nature de l'application. La complexité et la nature de l'événement à détecter, joue également un rôle crucial pour déterminer la quantité d'énergie consommée pour l'échantillonnage. Contrôler un événement sporadique¹ consomme moins d'énergie qu'un contrôle d'événement constant. Aussi, les environnements contenant un niveau de bruit élevé entraîne l'augmentation de l'énergie nécessaire pour la capture.

3.3.2 L'énergie de traitement (calcul)

Cette unité est constituée d'un microcontrôleur (microprocesseur) et une mémoire. L'énergie résiduelle de cette unité est dépensée lors de la commutation et aux fuites [M. Ilyas and I. M, 2005]. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre, l'énergie de fuite désigne l'énergie consommée par l'unité de calcul dans le cas où aucun traitement n'est effectué. Enfin il est à noter qu'un nœud peut contenir des circuits additionnels pour le codage/décodage des données, en plus de certains circuits spécifiques aux applications du réseau, dans tous ces cas, la conception des algorithmes et protocoles du réseau est influencée largement par l'énergie consommée par ces circuits. L'énergie de commutation E_{switch} est exprimée comme suit :

$$E_{switch} = C_{tot} V_{dd}^2 \quad (3.2)$$

Où : C_{tot} est la capacité totale commutée par le calcul, V_{dd}^2 est l'alimentation du voltage.

L'énergie perdue par la fuite E_{leak} est modélisée comme suit :

¹ Qui se produit de manière irrégulière

$$E_{leak} = (V_{dd}^t)^2 I_{leak} \frac{V_{th}}{e n V_t} \quad (3.3)$$

Où : V_{th} est le seuil du voltage du dispositif, V_t est le voltage thermique.

3.3.3 L'énergie de communication

L'unité de communication qui a pour rôle l'envoi et la réception de données, est l'unité la plus consommatrice en énergie [G. Pottie, W.K, 2000]. L'énergie de communication est déterminée par trois facteurs:

- La quantité des données échangées.
- La distance entre les nœuds.
- La puissance de la radio, quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée.

Heinzelman et al. proposent un modèle radio de consommation d'énergie [W. Heinzelman et al., 2000], figure 3.1. Ainsi, les énergies nécessaires pour émettre $E_{Tx(s,d)}$ et recevoir $E_{Rx(s)}$ des messages sont données par :

- La consommation d'énergie moyenne pour l'envoi d'un paquet (contenant s bits) vers un récepteur distant de d mètres est donnée par la formule suivante :

$$E_{Tx(s,d)} = E_{Tx elec(s)} + E_{Tx amp(s,d)} \quad (3.4)$$

$$E_{Tx(s,d)} = (E_{elec} * s) + (E_{amp} * s * d^2) \quad (3.5)$$

- Pour la réception d'un message des bits

$$E_{Rx(s)} = E_{Rx elec(s)} \quad (3.6)$$

$$E_{Rx(s)} = E_{elec} * s \quad (3.7)$$

E_{elec} et E_{amp} représentent respectivement l'énergie de transmission électronique et d'amplification.

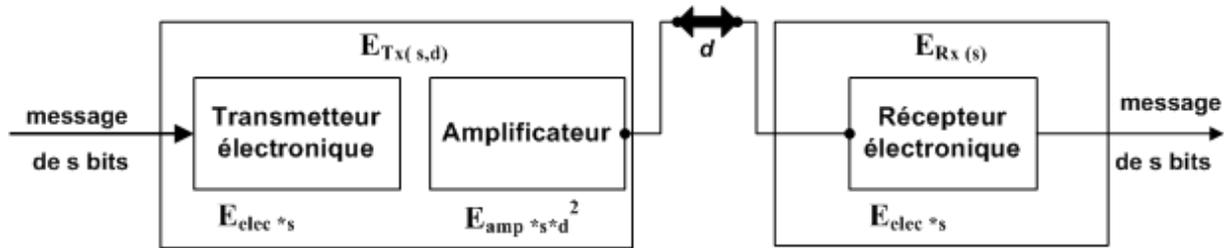


FIG. 3.1 – Modèle radio de consommation d'énergie [W. Heinzelman et al., 2000] .

Actuellement, les transmetteurs radio les plus économiques en consommation d'énergie possèdent une puissance d'émission/réception égale à 20 dbm^2 et des puissances de sortie proches de 0 dbm [10]. Il est à noter que le projet des nœuds capteurs picoradio envisage d'atteindre une puissance de transmission égale a -20 dbm

En outre, il existe d'autres formes de dissipation d'énergie telle que les lectures/écritures mémoire. Il est difficile d'apporter ici une étude quantitative précise sur la consommation d'énergie de chaque unité dans les nœuds capteurs vu la diversification des plates-formes commerciales existantes. Mais des études expérimentales montre que c'est la transmission des données qui est la plus consommatrice en énergie. Généralement, le coût de transmission d'un seul bit est approximativement équivalent ou supérieur à celui nécessaire pour l'exécution d'une milles instructions [G. Pottie, W.K, 2000].

3.4 Facteurs intervenants dans la consommation d'énergie

Il existe des facteurs qui induisent une consommation inutile de l'énergie (surconsommation). Ces facteurs sont nombreux, ils peuvent être engendrés lors de la détection lorsque celle-ci est mal gérée [Alippi et al., 2007], ou lors de la communication. En effet, la communication est sujette à plusieurs facteurs qui surconsomment de l'énergie surtout coté MAC. Certains de ces facteurs sont les causes majeures de la perte d'énergie et ils ont été recensé dans [Ali et al., 2008] [M. Ilyas and I. M, 2005].

² dBm (parfois dBmW) est une abréviation du rapport de puissance en décibels (dB) entre la puissance mesurée et un milliwatt (mW). Elle est utilisée dans les réseaux radio, micro-ondes et fibre optique comme une mesure commode de puissance absolue en raison de sa capacité à exprimer à la fois des valeurs très grandes et très petites sous une forme abrégée

3.4.1 Etat du module radio

Le module radio est le composant du nœud capteur le plus consommateur en énergie puisque c'est lui qui assure la communication entre les nœuds. Le module radio opère dans quatre modes de fonctionnement : idle, transmission, réception et sommeil.

- Dans l'état *idle* : la radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre.
- Dans l'état transmission : la radio transmet un paquet.
- Dans l'état réception : la radio reçoit un paquet.
- Dans l'état sommeil : la radio est mise hors tension.

Il a été observé que dans le cas de la plupart des radios que le mode *idle* induit une consommation d'énergie importante, presque égale à la consommation en mode *réception* suite à l'écoute inutile du canal de transmission [Ya Xu et al.,2001]. Ainsi, il est plus judicieux d'éteindre complètement la radio que de la laisser en mode *idle* quand elle n'est pas utilisée ni pour la transmission ni pour la réception des données. Le tableau 3.1 montre un exemple d'énergie consommée pour chaque état du module radio d'une carte B2400ZB-tiny [11]. Le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC. Par ailleurs, le passage d'un état à un autre peut être aussi une source de consommation d'énergie dû à l'activité des circuits électroniques.

Etat	Energie consommée
Emission	26 mA
Réception ou écoute	29 mA
En veille (Idle)	15 μ A
Sommeil	3 μ A

TAB. 3.1 – Energie consommée par état par le composant radio d'une carte B2400ZB-tiny [11].

3.4.2 Accès au support de transmission

La couche MAC a un rôle très important pour la minimisation de l'énergie consommée. Un protocole MAC économe en énergie essaie d'utiliser le moins souvent possible le module radio. Les modules radio peuvent avoir plusieurs niveaux de consommation quand ils ne sont pas en mode émission ou réception, moins le nœud consomme moins il est réactif, c'est pour cela que les différents états existent pour assurer une flexibilité selon le degré de réactivité demandé par la couche MAC.

L'utilisation inutile du module provient de six sources essentielles : la retransmission, l'écoute passive, l'écoute abusive, la surcharge, la surémission et la taille des paquets [M. Ilyas and I. M, 2005].

- **La retransmission**

Les nœuds capteurs utilisent généralement une seule antenne radio, cependant ils partagent le même canal de transmission. La transmission simultanée des paquets par les nœuds voisins peut engendrer des collisions. Ainsi une quantité des données transmises sera perdue. La retransmission de ses données perdues générera une perte significative de l'énergie.

- **L'écoute passive (*idle listening*)**

L'écoute passive du canal radio dans l'attente d'une éventuelle réception (le mode idle décrit précédemment) engendre une perte importante des capacités des nœuds en termes d'énergie. Ceci est coûteux et inutile dans le cas des réseaux à faible charge de trafic. De ce fait, basculer les nœuds capteurs en mode sommeil est une solution mais la transition entre les modes consomme également de l'énergie. Pour cette raison la fréquence de transition entre les modes doit rester raisonnable.

- **L'écoute abusive (*overhearing*)**

L'écoute abusive se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés figure 3.2. Le coût de l'écoute abusive peut être important dans le cas d'un réseau dense et avec une charge de trafic importante.

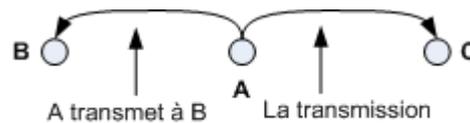


FIG. 3.2 – L'écoute abusive dans une transmission [M. Ilyas and I. M, 2005]

- La surcharge (L'overhead)

Plusieurs protocoles de la couche MAC, utilisent les paquets de contrôle pour maintenir une bonne communication entre les nœuds (signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions). L'échange de paquets nécessite une énergie additionnelle. Par ailleurs, comme ces paquets ne transportent pas directement des données, ils réduisent également le débit utile effectif.

- La surémission (Overemitting)

Le phénomène de surémission est produit quand des nœuds envoient des messages à des destinations qui ne sont pas prêtes à les recevoir, en effet ces messages sont considérés inutiles et consomment d'avantage de l'énergie.

- La taille des paquets

La taille des paquets a un effet sur la consommation d'énergie. En effet, si la taille des paquets est réduite, le nombre de paquets de contrôle échangés augmente ce qui génèrera un overhead. Dans le cas contraire, une taille grande des paquets nécessite l'utilisation d'une grande puissance de transmission.

3.4.3 Modèle de propagation radio

Le modèle de propagation représente une estimation de la puissance moyenne reçue du signal radio à une distance donnée d'un émetteur. La propagation du signal radio est généralement soumise à différents phénomènes : la réflexion, la diffraction et la dispersion par divers objets. Généralement, la puissance du signal reçue est de l'ordre de $1/d^n$, où d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, n un exposant de perte d'un chemin (Exemple : $n=2$ dans le vide, de 4 à 6 dans un immeuble) [H. Namgoog et al., 2005].

3.4.4 Routage des données

Le routage des données peut avoir un impact sur la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs multi-sauts. L'acheminement des paquets d'une source à une destination se fait à travers des nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud capteur consomme de l'énergie soit pour transmettre ou relayer les données des autres nœuds. Dans ce sens, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau.

3.5 Les méthodes de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Comme on la déjà cité en introduction, les trois taches principales, d'un nœud capteur, qui consomment de l'énergie sont: la capture, le traitement et la communication.

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 le module de traitement et par-dessus tout, le module de communication. Dans d'autre cas, l'énergie dépensée par la détection peut être comparable ou supérieure à celle dépensée par la transmission. Plusieurs approches ont été proposées afin d'optimiser l'énergie au niveau de ces trois tâches. Par ailleurs, plusieurs classifications de ces dernières ont été proposées dans la littérature. Nous avons choisi la classification faite dans [M. Ilyas and I. M, 2005] comme montrée dans la figure 3.3, nous avons également partagé les méthodes de hiérarchisation en deux classes.

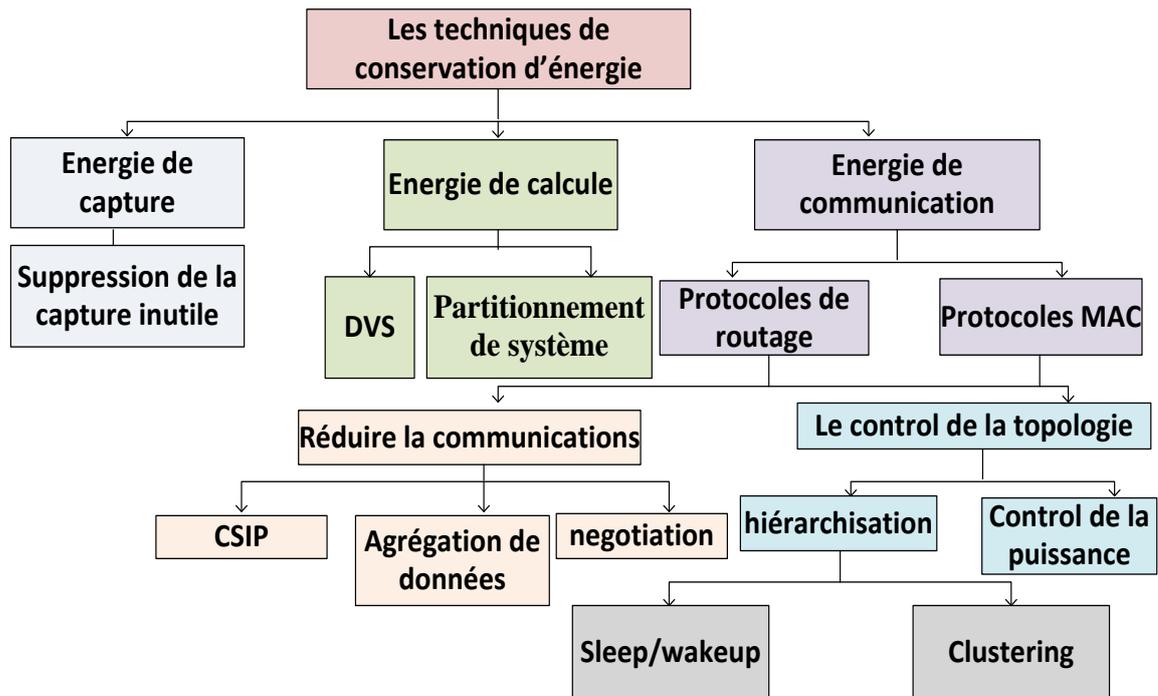


FIG. 3.3 – Les méthodes de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil [M. Ilyas and I. M, 2005]

3.5.1 Les méthodes proposées pour optimiser l'énergie de capture

Le module de détection affecte la consommation d'énergie de deux manières :

- **L'échantillonnage inutile** : Vu la densité du réseau de capteurs, les données échantillonnées ont souvent de fortes corrélations spatiales et/ou temporelles. Il est donc inutile de communiquer les informations redondantes à la station de base. En fait, même si le coût de la détection est négligeable, la communication des données redondante implique une surconsommation d'énergie.
- La consommation électrique du module de détection dans le cas des capteurs gourmands en énergie

Des techniques visant à réduire l'échantillonnage inutile ont été conçues pour minimiser l'énergie dépensée par le module de détection.

3.5.1.1 Enlever l'échantillonnage inutile

Selon la classification faite dans [Vijay R et al., 2006] il existe trois principales techniques : échantillonnage adaptatif, échantillonnage hiérarchique et l'échantillonnage actif fondé sur un modèle (Model-based active sampling).

1) *Echantillonnage adaptatif*

Les approches proposées pour l'échantillonnage adaptatif exploitent les corrélations spatiales et temporelles des données pour réduire la quantité de données à acquérir par le module de détection. A titre d'exemple, les données intéressantes peuvent changer lentement dans le temps, dans ce cas, des corrélations temporelles peuvent être exploitées pour réduire l'échantillonnage inutile. Tandis que, la corrélation spatiale peut être utilisée quand le phénomène étudié ne change pas brusquement entre les régions couvertes par des nœuds voisins. Il est évident, les corrélations spatiales et temporelles peuvent être exploitées conjointement, pour réduire efficacement la quantité de données à acquérir. Vu que ce type de technique utilise des corrélations spatiales et temporelles, elles sont plus appropriées pour des types de réseaux où les changements ne sont pas trop fréquents.

2) *Echantillonnage hiérarchique*

Le but de ce type d'approches consiste à trouver un compromis entre la consommation d'énergie et la précision. Étant donné que les capteurs qui donnent de très bonne précision sont gourmands en énergie, l'idée est d'utiliser différents types de capteurs avec des caractéristiques de puissance différentes. Un exemple d'utilisation de ce type d'approche : la détection des voitures soupçonnées. Dans ce cas, des capteurs simples (tels que le magnétomètre à faible puissance) peuvent être utilisés pour détecter les véhicules. Et pour avoir plus de précision, des capteurs plus puissants sont utilisés.

L'échantillonnage hiérarchique est plus approprié aux applications qui nécessitent beaucoup de précision. Cette technique peut coupler entre la conservation d'énergie et la précision.

3) *l'échantillonnage actif fondé sur un modèle (Model-based active sampling)*

Ces approches utilisent un mécanisme similaire à la prédiction de données. Un modèle du phénomène mesuré est construit à base des données échantillonnées. Ce modèle est ensuite

utilisé pour prédire les données futures avec une certaine précision en réduisant ainsi le nombre d'échantillonnage. L'idée de base est la suivante : Le capteur

- Analyse la relation spatiotemporelle parmi les mesures effectuées par le capteur,
- Utilise cette connaissance pour optimiser l'échantillonnage.

Les techniques basées sur l'utilisation de modèle permettent non seulement de réduire le nombre de données échantillonnées mais aussi de réduire le nombre de communication malgré que ce ne soit pas leur objectif principal. Cependant, dans ce type d'approche on ne peut pas évaluer les données avec certitudes car elles sont dérivées du modèle construit.

3.5.2 Méthodes proposées pour minimiser l'énergie de calcul

Comme mentionné précédemment, l'énergie de calcul est dépensée lors de la commutation et aux fuites (l'énergie de fuite désigne l'énergie consommée par l'unité de calcul dans le cas où aucun traitement n'est effectué) [M. Ilyas and I. M, 2005]. Cette dernière peut être optimisée en utilisant deux techniques: technique d'adaptation dynamique de la vitesse et de la tension du processeur DVS (*Dynamique Voltage Scalling*) et technique de Partitionnement du système.

3.5.2.1 techniques d'adaptation dynamique de la vitesse et de la tension du processeur (DVS)

Comme mentionné précédemment, l'énergie dépensée par l'unité de calcul dépend très fortement de la tension d'alimentation (le voltage). De ce fait, minimiser la dépense énergétique du calcul est liée à la minimisation du voltage. C'est dans ce sens que le DSV a été proposé et déployé dans des microprocesseurs [R. Kravets and P. K, 2000] [K. Flautner et al., 2000]. Le DVS permet aux processeurs de changer leur voltage et d'ajuster leur fréquence selon la demande de l'application sans pour autant dégrader les performances de ces derniers. De cette manière, la technique DVS aide les capteurs à bien conserver leurs énergies. L'idée de base consiste à régler la tension d'alimentation de sorte que le processeur fonctionne à un rythme long quand la charge du travail du processeur est faible [Wei Li et al., 2006]. Par contre, si la charge du travail est grande, alors le DVS contrôle le processeur pour qu'il travaille à une grande vitesse. Cette technique est appliquée dans des systèmes mobiles et des dispositifs embarqués [Y. Zhu and F. M, 2004].

Une autre approche appelée CO-DVS conçue pour les systèmes temps réel a été proposée par Wei Li et al. dans [Wei Li et al., 2006]. En général, l'approche DVS utilisée dans les systèmes temps réel vise à réduire l'énergie au niveau de chaque nœud individuellement ; en ignorant d'autres contraintes comme le délai de bout-en-bout (end-to-end deadline) de l'application ou/et la consommation d'énergie au niveau des voisins.

Le but principal de l'approche CO-DVS consiste à permettre aux nœuds du réseau (la station de base et les autres nœuds du réseau) de coordonner leurs DVS pour réduire l'énergie consommée et la latence du système. La technique du CO-DVS est destinée pour les applications temps réel où la notion de deadline et d'opportunité (timeliness) est très importante. Dans ce type d'application, en plus de la contrainte d'énergie nous trouvons la contrainte de latence. Cette technique a permis d'optimiser l'énergie totale dépensée car elle prend en considération l'énergie résiduelle des nœuds et aussi la latence du système en utilisant la coordination entre les différents CPU³ [Wei Li et al., 2006]. Cette technique a été testée dans deux types de réseau homogène et hétérogène (homogène utilise la même source d'énergie, et hétérogène chacun a sa propre source d'énergie).

En appliquant la technique CO-DVS dans un système non coopératif, les résultats montrent que l'épuisement d'énergie d'un nœud critique (source) est de l'ordre de 51% plus rapide que d'un système coopératif.

Généralement les approches proposées dans les systèmes temps réel ne sont pas directement applicables pour les systèmes d'exploitations (OS) proposés car les caractéristiques de la charge de travail doivent être précisément spécifiées au ordonnanceur (la périodicité, deadlines...) d'autres approches ont été proposées où tous ces paramètres sont définies automatiquement en se basant sur le ratio du temps d'inactivité et le temps de disponibilité dans le processeur.

Krisztián Flautner et al., proposent dans [Krisztián Flautner et al., 2002] une approche (Automatic Performance Setting for Dynamic Voltage Scaling) qui vise à contrôler automatiquement le DVS implémenté dans les processeurs dans le but de contrôler la puissance sans dégrader la performance du processeur.

³ Central Processing Unit : le processeur

3.5.2.2 Techniques de partitionnement du système

Les techniques de partitionnement du système peuvent être utilisées pour réduire l'énergie dépensée dans le sous système de calcul. Deux techniques sont utilisées [M. Ilyas and I. M, 2005], la première consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul. Tandis que, la deuxième partage le calcul entre les nœuds au lieu de placer des centres de calcul.

Dans [K. Flautner et al., 2000] les auteurs : K. Flautner, R. Uhlig, S. Reinhardt and T. Mudge proposent un partitionnement du calcul dans un réseau de capteurs distribués organisés en clusters.

Ce mécanisme a été implémenté et testé dans une application de localisation par estimation de ligne de Bering (LOB) pour des sources acoustiques. Les étapes de l'estimation de la ligne de Bering LOB sont résumées comme suit :

- Transformer les données collectées par les capteurs en fréquences en utilisant 1024 pt. FFT (transformé de Fourier)⁴.
- Après le coefficient FFT est utilisé par l'algorithme de beamforming et l'estimation de ligne de Bering (LOB) pour calculer le résultat final. A la fin, ce résultat sera envoyé à l'utilisateur final.

Dans un système non partitionné ce calcul s'effectue au niveau du cluster-head, qui est le capteur responsable de la collecte et l'envoi des données à l'utilisateur final. Ce calcul au niveau d'un seul nœud génère une latence et l'épuisement rapide de son énergie. C'est la raison pour laquelle l'approche proposée vise à partager le calcul du coefficient FFT entre les capteurs. Chaque capteur calcule son FFT et l'envoi au cluster-head, ce dernier fusionne ces coefficients. Ensuite, le cluster-head envoie le résultat du LOB à la station de base. Au niveau de la station de base, plusieurs LOB peuvent être combinées afin de pouvoir calculer la position de la source. En revanche, l'utilisation du partitionnement dans ce cas, n'optimise

⁴ La transformée de Fourier rapide (sigle anglais : FFT ou Fast Fourier Transform) est un algorithme de calcul de la transformée de Fourier discrète (TFD). Cet algorithme est couramment utilisé en traitement numérique du signal pour transformer des données discrètes du domaine temporel dans le domaine fréquentiel, en particulier dans les analyseurs de spectre. Son efficacité permet de réaliser des filtrages en modifiant le spectre et en utilisant la transformée inverse

pas la consommation d'énergie car le partitionnement du calcul ne diminue pas la quantité de données qui nécessite d'être transmise.

Afin d'offrir plus d'avantage énergétique, la technique DVS a été introduite. Dans le cas d'un système distribué, l'approche proposée dans [K. Flautner et al., 2000] recommande l'ordonnement optimal de la fréquence du processeur pour plus de flexibilité. Une méthode pour calculer le voltage et la fréquence optimaux a été introduite.

Les deux techniques de conservation d'énergie de calcul peuvent être complémentaires, leur combinaison peut améliorer d'avantage la conservation d'énergie comme dans [K. Flautner et al., 2000]. La combinaison des deux techniques DVS et le partitionnement du système a donné une amélioration énergétique de 60%.

3.5.3 Méthodes proposées pour minimiser l'énergie de communication

Des mesures expérimentales ont montré que généralement c'est la transmission des données qui consomme le plus d'énergie. Comme cité précédemment cette dernière est influencé par plusieurs facteurs qui ont un lien très étroit avec la couche MAC et la couche réseau.

De ce fait, la conception des protocoles de conservation d'énergie doit prendre en considération les contraintes liées à la couche MAC et réseau.

La minimisation de l'énergie dépensée côté MAC et réseau peut être atteinte soit en réduisant le nombre d'émission/réception des messages ou par le contrôle de la topologie.

3.5.3.1 Réduire le nombre de communication

Réduire le nombre de communication signifie moins d'utilisation de la radio. Ainsi, la consommation d'énergie peut être optimisée d'une manière significative, la réduction du nombre de communication peut être achevée grâce à trois techniques : agrégation de données, Négociation et CSIP

1) Agrégation de données

Les nœuds voisins dans les réseaux de capteurs, étant donné qu'ils sont très corrélés spatialement et temporellement, peuvent générer les mêmes données qui seront ensuite transférées à la station de base (sink), à un moment donné les nœuds intermédiaires peuvent avoir les mêmes données reçues des nœuds sources. Pour éliminer cette redondance et

minimiser ainsi la quantité de données transférées à la station de base, des techniques d'agrégation de données sont utilisées.

Généralement les méthodes d'agrégation de données visent à éliminer la duplication des données, en les agrégeant au niveau des nœuds intermédiaires. Ceci, minimisera l'énergie dépensée pour la transmission des données qui représente 70% de l'énergie consommée par le nœud capteur.

PEGASIS [Lindsey et al., 2002] et l'approche « A Data Agregation Algorithm Based on Splay Tree for Wireless Sensor Networks » [ZHANG et al., 2010] sont deux protocoles d'agrégation de données dédiés pour les réseaux de capteurs sans fil.

- PEGASIS

L'idée de base du protocole PEGASIS est de former une chaîne parmi les nœuds du réseau de sorte que chaque nœud reçoit ou transmet des données au voisin le plus proche de lui. Ainsi, il ajuste sa radio pour une communication très courte pour conserver son énergie. Les données collectées passent d'un nœud à un autre, elles seront fusionnées et par la suite un nœud élu les transmettra à la station de base. Les nœuds responsables de la transmission des données seront élus à tour de rôle de telle sorte que l'énergie moyenne dépensée par chaque nœud est réduite. Pour la construction de la chaîne l'algorithme Greedy⁵ est utilisé.

- A Data Agregation Algorithm Based on Splay Tree for Wireless Sensor Networks

L'approche « *A Data Aggregation algorithm Based on Splay Tree for wireless sensor network* » fait de l'agrégation en se basant sur la construction d'un arbre évasé (splay tree), appelé arbre d'agrégation.

L'arbre d'agrégation nommé *AT* contiendra des nœuds appelés les nœuds de l'arbre *Nt*, cet arbre est responsable de l'agrégation des données envoyées par les autres nœuds du réseau qui n'appartiennent pas à cet arbre. Les autres nœuds du réseau n'appartenant pas à l'arbre d'agrégation sont appelés *NT* (not tree node), chaque nœud dans *NT* surveille son environnement et transmet les données captées à l'arbre d'agrégation *AT* le plus proche de lui. L'arbre d'agrégation doit être étalé tout au long du réseau de capteurs, de sorte que les nœuds *NT* sont distribués uniformément dans le réseau pour assurer que les données

⁵ Le principe de tels algorithmes consiste à choisir des solutions locales optimales d'un problème dans le but d'obtenir une solution optimale globale au problème

envoyées par les nœuds *NT* à *AT* induisent à un nombre de sauts réduits et ainsi la durée de vie des nœuds *NT* est prolongée.

Dans l'arbre d'agrégation les données sont stockées et agrégées par l'utilisation de régression polynomiale, ces données seront ensuite envoyées à la racine de l'arbre, qui à son tour envoie les données finales à la station de base.

2) CSIP (Collaborative Signal and Information Processing)

Les méthodes de CSIP visent à combiner entre plusieurs disciplines : la communication et le calcul à basse fréquence, traitement de signal, algorithmes distribués et tolérance aux fautes, systèmes adaptatifs et théorie de fusion des capteurs et des décisions [S. Kumar et al., 2002]. Les modèles de calcul pour le CSIP déjà utilisés pour les réseaux de capteurs peuvent être divisés en deux catégories : des modèles client-serveur et les modèles basés sur les agents mobiles.

Dans les modèles client-serveur les nœuds capteurs représentent les clients, la station de base (le sink) et le serveur. Dans ce modèle, les données sont transférées à la station de base pour être traitées. Les modèles basés sur des agents mobiles sont une autre alternative pour supporter le calcul distribué. Dans ce type de modèle, la station de base (le serveur) envoie des agents mobiles contenant les méthodes nécessaires pour le traitement des données. Les agents mobiles migrent vers les nœuds capteurs (les clients) et ainsi traitent les données des capteurs localement. Les agents mobiles migrent d'un nœud à un autre en effectuant ainsi la fusion de données.

D'après des expériences faites par [S. Kumar et al., 2002], il a été observé que les méthodes basées sur les agents mobiles sont plus performantes en termes d'énergie pour les réseaux de capteurs à grande échelle où le nombre de nœuds est de l'ordre de milliers. Tandis que dans un réseau à faible densité c'est la méthode client-serveur qui est la plus performante. Dans ce contexte Yingyue Xu et Hairong Qi propose une méthode hybride supportant CSIP [Yingyue and H.Q, 2004].

Le nouveau paradigme proposé est un paradigme hybride qui vise à combiner entre les points forts des deux paradigmes de calcul existants. L'idée est de partager le réseau en clusters, chaque cluster a un cluster head. Pour faire fonctionner le paradigme hybride deux méthodes ont été proposées : dans la première méthode le paradigme basé sur les agents mobiles est

exécuté au sein du cluster, le cluster head envoie les agents mobiles vers les nœuds, ces derniers traitent les données au niveau des nœuds dans le cluster, après il retourne au cluster head. Par la suite, le cluster head forme des résultats partiels qui seront envoyés au centre de calcul.

La première méthode est utilisée quand le nombre de cluster est petit et le nombre de nœud au niveau du cluster est grand.

Dans la deuxième méthode le paradigme client serveur est employé dans le cluster et le paradigme d'agent mobile est effectué entre le centre de calcul et le cluster head. Dans cette méthode, les nœuds au niveau du cluster envoient les données directement au cluster head qui va générer des résultats partiels. Après une période de temps un agent mobile est envoyé au centre de calcul afin d'intégrer ces résultats. Cette méthode est utilisée quand le nombre de cluster est grand et le nombre de nœuds dedans est petit.

3) *La négociation (SPIN)*

Cette famille de protocole [Joanna Kulik et al., 1999] est adaptée aux réseaux de capteurs. Ce type de protocoles a été proposé dans le but de remédier aux limites des protocoles de dissémination de données existants tel que l'inondation classique (*classic flooding*). Les protocoles de dissémination de données existants souffrent de trois limites qui les rendent inadéquat pour les réseaux de capteurs : Implosion, chevauchement (overlap), l'ignorance des ressources (Resource blindness).

- *Implosion*

Dans l'inondation classique, les nœuds peuvent recevoir la même information de différents nœuds cela provoquera ce qu'on appelle l'implosion au niveau des nœuds

- *Chevauchement (Overlap)*

Le chevauchement se produit dans le cas où les nœuds couvrent une région du chevauchement (overlapping region), et les nœuds collectent les mêmes données.

- *L'ignorance des ressources (Resource blindness)*

Généralement dans l'inondation classique les nœuds n'adaptent pas leurs activités en fonction de leurs taux d'énergie à un instant donné.

Pour remédier à ces limites les méthodes SPIN ont été proposées. Un nœud implémentant SPIN négocie avec les autres nœuds avant de transmettre les données afin d'assurer que seulement les données utiles sont transférées. Pour une négociation réussie entre les nœuds chacun d'eux doit décrire les données qu'il observe, cette description est appelée métadonnées. Pour la communication les nœuds utilisent trois types de messages :

- *ADV (new data advertisement)* : Quand un nœud SPIN a une donnée à partager, il l'annonce aux autres nœuds en utilisant le message ADV qui contiendra les métadonnées.
- *REQ (request for data)* : un nœud implémentant SPIN envoie ce message quand il désire recevoir quelques données actuelles.
- *DATA (data message)* : ce message contient les données actuelles du nœud capteur.

Deux protocoles dans la famille SPIN ont été proposés SPIN-1 et SPIN-2. L'idée de base de la méthode SPIN-1 est comme suit :

Quand un nœud capteur désire envoyer une donnée, il diffuse un message ADV contenant la métadonnée de la donnée en question. Quand un nœud reçoit le message ADV, il consulte sa base d'intérêt. Si cette donnée l'intéresse, il émet un message REQ vers son voisin émetteur d'ADV. En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA. Le protocole se termine par l'envoi d'un message DATA, qui va contenir la donnée à envoyer, par le nœud initiateur.

Le protocole SPIN-2 ajoute au SPIN-1 un simple mécanisme de conservation d'énergie, ce protocole travaille tout en respectant son énergie restante. Quand l'énergie est largement suffisante il communique avec ces voisins en utilisant les trois étapes que SPIN-1, s'il remarque que son niveau d'énergie a atteint un certain seuil il change son mode de fonctionnement (il ne répond à aucun message ADV).

Les protocoles SPIN sont plus appropriés pour les réseaux de capteurs mobiles parce qu'ils fondent leurs décisions d'acheminement des paquets sur des informations locales sur leurs voisinage.

3.5.3.2 Le contrôle de topologie

Pour le contrôle de topologie nous avons deux mécanismes : le contrôle de puissance et la hiérarchisation.

1) *Le contrôle de puissance*

Les techniques de contrôle de puissance visent essentiellement à optimiser la puissance utilisée de la radio, elles permettent aux nœuds d'ajuster leurs puissances radio dans le but de minimiser la consommation d'énergie. Les techniques de contrôle de puissance n'ont pas seulement un effet sur la consommation énergétique des nœuds capteurs mais aussi influent la connectivité du réseau. En outre, ils doivent assurer une transmission avec succès des paquets de données vers une destination. Les protocoles ATPC (Adaptive Transmission Power for Wireless Sensor Networks) [S. Lin et al., 2006], LMA et LMN (Local Mean Algorithm and Local Mean of Neighbours Algorithm) [Kubisch et al., 2003] font partie de cette catégorie. Cette catégorie de protocole sera détaillée dans le chapitre 4.

2) *Hiérarchisation*

Les méthodes de l'hiérarchisation consistent à organiser le réseau en structures à plusieurs niveaux. Nous trouvons dans cette catégorie deux grandes familles : les méthodes du groupement (*clustering*) et les méthodes sommeil/réveil (*sleep/wakeup*)

- *Les méthodes du groupement (clustering)*

Les Algorithmes du groupement (*clustering*) organisent le réseau en sous réseaux (clusters), plus homogènes selon une métrique ou une combinaison de métriques, formant ainsi une topologie virtuelle. Chaque cluster identifie un nœud particulier appelé cluster-head. Le cluster-head, permet de coordonner entre les nœuds membres de son cluster, d'agréger leurs données collectées et de les transmettre par la suite à la station de base. De ce fait, seulement les nœuds leader seront responsables de l'acheminement de l'information collectée vers la station de base. Minimisant ainsi l'énergie consommée par les nœuds capteurs.

Il existe plusieurs méthodes de formation de clusters. La méthode la plus répandue [A. Safwat and H. H, 2002] [C.R. Lin and M. G, 1997] [M. Chatterjee et al., 2002] [LEHSAINI M, 2009] s'exécute comme suit :

- Chaque nœud découvre son voisinage en utilisant des messages Hello.
- Chaque nœud décide, en se basant sur des informations locales sur la topologie, s'il va devenir cluster-head ou pas.

- Le nœud élu comme cluster-head diffuse un message dans son voisinage invitant ses voisins qui ne sont pas encore affiliés à un autre cluster de le rejoindre.

a) L'élection du cluster-head

La phase d'élection du cluster-head appelée aussi la phase Set-up, utilise une métrique (le degré de connectivité, l'énergie restante, mobilité...) ou une combinaison de métriques pour choisir un nœud leader qui est le cluster-head.

b) Communication intra-cluster et inter-cluster

Chaque cluster-head est chargé d'assurer une bonne communication au sein de son cluster. Par ailleurs, il doit assurer le routage entre les différents cluster-heads en maintenant les informations liées au routage. De plus, étant donné que les cluster-heads ne sont pas directement reliés, des nœuds passerelles doivent être choisis pour assurer la communication entre les cluster-heads.

c) La maintenance des clusters

Une mise à jour des clusters est réalisée soit dans le but de s'adapter aux changements de la topologie (dans le cas où un cluster-head ou un membre du cluster migre d'un cluster à un autre) soit pour équilibrer la consommation d'énergie dans le réseau (si le cluster-head garde son statut le plus longtemps possible, sa batterie sera épuisée, et ainsi il perdra son rôle). Parmi les protocoles proposés dans cette catégorie : LEACH [W. Heinzelman et al., 2000] et TEEN [A. Manjeshwar and D.P, 2001] .

- LEACH

LEACH est le protocole hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs sans fil. Ce protocole a été conçu pour réduire l'énergie consommée dans le réseau. Ce dernier divise le réseau en sous réseaux en formant ainsi des clusters. Ce protocole offre à chaque nœud la possibilité de prendre la décision s'il veut être cluster head ou pas en calculant aléatoirement une probabilité P_u et en la comparant à un seuil $T(u)$. Ensuite, le nœud informe son voisinage de sa décision. Par la suite, les autres nœuds choisissent le cluster head le plus proche pour le rejoindre. L'algorithme se déroule en plusieurs rounds et pour chaque round, une rotation

aléatoire du cluster head est exécutée selon la probabilité P_u choisie et comparée au seuil $T(u)$ dans le but d'équilibrer la consommation d'énergie dans le réseau.

Les communications à l'intérieur d'un cluster sont effectuées avec la méthode TDMA⁶ (*Time division multiple access*) : chaque cluster head établit un calendrier TDMA pour les nœuds membres de son cluster en indiquant pour chaque nœud son slot d'émission. Le calendrier se répète quand le dernier nœud du calendrier envoie ses données. Les nœuds capteurs utilisent ce slot d'émission pour la transmission des données captées. De ce fait, les nœuds capteurs peuvent éteindre leurs radios en dehors de la période d'émission pour éviter la perte d'énergie dû à l'écoute passive du canal de transmission.

LEACH est totalement distribuée et n'a besoin d'aucune connaissance globale sur le réseau, le nœud capteur n'a pas besoin de connaître la position des nœuds. Cependant, il utilise un routage à saut unique où chaque nœud peut transmettre directement au cluster-head ou la station de base. La figure 3.4 montre les opérations de LEACH

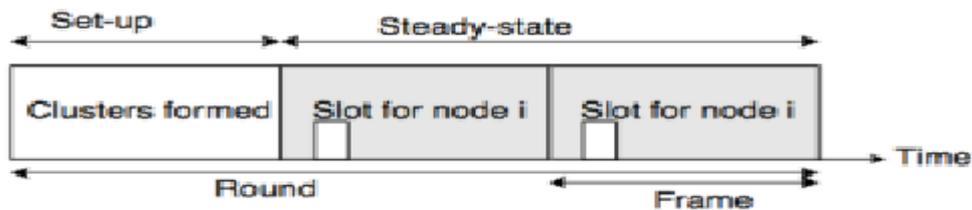


FIG. 3.4 – les opérations du protocole LEACH [W. Heinzelman et al., 2000]

- TEEN

Le protocole TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) a été développé à partir de LEACH mais à la différence de LEACH qui est orienté temps, TEEN est quant à lui orienté événement.

Les nœuds dans le protocole TEEN surveillent l'environnement continuellement, mais ils ne transmettent des données que lorsque les valeurs des capteurs changent considérablement. Les nœuds du cluster sont sélectionnés à tour de rôle pour devenir Cluster-Head (**CH**) pour un

⁶ Est un mode de multiplexage permettant de transmettre plusieurs signaux sur un seul canal. Il s'agit d'un multiplexage temporel qui consiste à diviser le temps en petits intervalles. Les utilisateurs émettent alors sur des intervalles de temps différents.

intervalle de temps limité. A la sélection du nouveau cluster-head, ce dernier envoie à ses membres deux seuils : **HT** (*Hard Threshold*) et **ST** (*Soft Threshold*).

- **HT** (*Hard Threshold*) : représente la valeur du seuil pour les attributs détectés.
- **ST** (*Soft Threshold*) : représente le petit changement dans la valeur de l'attribut détecté.

Au début, quand un paramètre de l'ensemble d'attributs détectés atteint le **HT**, le nœud transmet ses données collectées au Cluster-Head. La valeur collectée est stockée dans une variable intermédiaire dans le nœud appelée : **SV** (*Sensed Value*).

Ensuite, le nœud ne transmettra ses données que dans les deux cas suivants :

- La valeur courante de l'attribut détecté est supérieure au seuil **HT**.
- La valeur actuelle de l'attribut détecté diffère de **SV** par un montant égal ou supérieur au seuil **ST**.

Chaque fois qu'un nœud transmet des données, la valeur de la variable **SV** sera égale à la valeur courante de l'attribut détecté.

L'utilisation du seuil **HT**, permet de réduire le nombre de transmission en autorisant les nœuds à transmettre uniquement lorsque l'attribut est détecté dans la plage d'intérêt. Par ailleurs, l'utilisation du seuil **ST** réduit encore le nombre de transmission par l'élimination de toutes les transmissions qui, auraient eu lieu quand il y a peu ou pas de changement dans l'attribut détecté.

Cependant, l'inconvénient principal de ce protocole est que, si les seuils **HT** et **ST** ne sont pas reçus, les nœuds ne communiqueront jamais, et aucune donnée ne sera transmise à l'utilisateur, ainsi la station de base ne connaîtra pas les nœuds qui ont épuisé leurs énergies.

Les méthodes du groupement ont été proposées essentiellement pour les réseaux à très grande échelle, afin de garantir un passage à l'échelle et une minimisation de l'énergie consommée. Les méthodes du groupement sont souvent utilisées pour optimiser le routage.

- **Les méthodes du sommeil/ réveil (*sleep/wakeup*)**

Les méthodes du *sommeil/réveil* (*sleep/wakeup*) exploitent la redondance des nœuds, ce qui est typique dans les réseaux de capteurs, et d'une manière adaptative sélectionnent seulement un sous-ensemble de nœuds qui doivent rester actifs pour le maintien de la connectivité. Les

Nœuds qui ne sont pas actuellement nécessaires pour pouvoir assurer la connectivité peuvent se mettre en mode sommeil et ainsi économiser de l'énergie. Dans ce type de méthodes, les nœuds coordonnent leurs périodes de sommeil et de réveil, ils se mettent d'accord sur les dates auxquelles ils doivent basculer entre l'état actif et l'état sommeil, de sorte que les nœuds voisins soient actifs en même temps. Ce qui rendra possible l'échange de paquets, même si les nœuds dorment la plus part du temps.

Les régimes du sommeil/réveil peuvent être définis pour un composant donné (à savoir le sous-système radio) du nœud de capteur, sans s'appuyer sur la topologie ou les aspects de la connectivité. Elles peuvent être implantées comme des protocoles indépendants au-dessus du protocole MAC (c'est à dire couche réseau ou application). Les protocoles indépendants du sleep/wakeup peuvent être subdivisés en trois catégories principales [Trevor A, 2005] : à la demande (On demande), rendez-vous programmés (Scheduled rendez-vous) et les régimes asynchrones.

a) Les protocoles à la demande (On demand)

Ces régimes sont fondés sur l'idée qu'un nœud devrait être réveillé au moment où il doit recevoir un paquet d'un nœud voisin. Cela permet de minimiser la consommation énergétique et, par conséquent, ce type de régime est approprié pour des applications de réseaux de capteurs à très faible cycle d'utilisation (par exemple, détection incendie, la surveillance des défaillances des machines...etc.). Ce type de régime vise à réduire la consommation d'énergie par le contrôle de l'Etat de la radio tout en assurant un temps de retard limité pour la transition d'Etat. L'implantation de tels systèmes nécessite en général deux canaux différents: *un canal de données* pour la communication des données normales et un *canal de réveil* pour réveiller les nœuds en cas de besoin. Cela permet de réduire le retard du réveil. STEM, STEM-T et PTW c'est des exemples de ce type de protocole.

- STEM

Le protocole STEM (Sparse Topology and Energy Management) [Curt Shurgers et al., 2002] est l'un des protocoles qui utilise deux radios différentes, une pour le signal de réveil et une autre pour la transmission de paquet de données. La radio utilisée pour le réveil n'est pas une radio de faible puissance (pour éviter les problèmes associés aux différents portés de

transmission). Par conséquent, un régime duty-cycle asynchrone est utilisé pour la radio réveil aussi.

- **STEM-T**

Dans [Curt .S et al., 2002], les auteurs proposent une variante (dénommée STEM-T) qui utilise un ton de réveil (*wakeup tone*). Quand un nœud source (initiateur) doit communiquer avec un nœud voisin (cible), il envoie un ton de réveil sur le canal de réveil. Dès que le nœud récepteur reçoit le ton de réveil, il renvoie un accusé de réveil et il allume sa radio de données. La principale différence entre STEM et STEM-T est que dans les STEM-T tous les nœuds qui se situent au voisinage de l'initiateur sont réveillés. Les deux approches STEM et STEM-T peuvent être utilisées en combinaison avec d'autres méthodes de routage, par exemple l'utilisation de GAF [Ya Xu et al.,2001] et STEM peut augmenter la durée de vie du réseau par un facteur de 100 [Curt .S et al., 2002] mais, il en résulte un temps de latence de réveil important.

- **PTW**

[Xue Y and H.V, 2004] propose un régime appelé Pipelined Wakeup Tone (PTW). Comme STEM, PTW repose sur deux canaux différents pour la transmission des signaux de réveil et la transmission de paquets de données, et il utilise un ton de réveil pour réveiller les nœuds voisins.

Contrairement à STEM, dans PTW la charge de détection de tonalité est changée du récepteur à l'expéditeur. Comme dans STEM la transmission de données est réglementée par le protocole sous-jacent MAC.

Il était montré dans [Xue Y and H.V, 2004] que PTW surpasse STEM de manière significative en termes d'économies d'énergie et de latence de message, surtout lorsque le débit du nœud (bit rate) est faible.

b) Les régimes de rendez-vous programmés (Scheduled rendez-vous)

Les protocoles du rendez-vous programmés exigent que tous les nœuds voisins se réveillent en même temps. Le principal avantage de ces régimes est quand un nœud est réveillé, tous ses voisins seront réveillés aussi. Typiquement les nœuds voisins se réveillent suivant un ordonnancement de réveil et demeurent actifs durant un intervalle de temps bien précis pour l'échange de données ensuite ils se redorment jusqu'au prochain rendez-vous

Les protocoles du rendez-vous programmés proposés dans la littérature diffèrent dans la manière dont les nœuds du réseau se réveillent et dorment pendant leurs durées de vie. Le plus simple est l'utilisation d'un modèle entièrement synchronisé. Dans ce cas, tous les nœuds du réseau se réveillent en même temps, selon un schéma périodique (periodic pattern). Un régime de réveil entièrement synchronisé est également utilisé dans des protocoles MAC tels que S-MAC [W. Ye et al., 2004], T-MAC [Tijds V. D, K. L, 2003] et D-MAC [G. Lu et al., 2004].

- S-MAC

Le protocole S-MAC (Sensor-MAC) est conçu pour les réseaux de capteurs sans fil pour fournir une méthode d'accès économe en énergie. Il a été conçu pour atteindre les objectifs suivants: minimiser l'énergie consommée pendant qu'il supporte un bon passage à l'échelle et éviter les collisions.

Chaque nœuds met en mode sommeil sa radio pendant un certain temps, après il se réveille pour vérifier si l'un de ses voisins va lui envoyer un paquet, ce protocole nécessite une synchronisation entre les nœuds, chaque nœuds a la liberté de choisir sa propre synchronisation, tous les nœuds échangent leurs synchronisations afin qu'ils se mettent d'accord sur les périodes du sommeil/réveil, (le protocole S-MAC est un protocole entièrement synchronisé cela signifie que tous les nœuds voisins se réveillent et dorment en même temps), les nœuds doivent mettre à jour, périodiquement, leurs ordonnancements. La mise à jour est faite par l'échange de paquet SYNC qui contiendra le ID du nœud expéditeur plus le temps de son prochain sommeil.

Pour remédier aux problèmes de collision, les nœuds accèdent au médium en utilisant le CSMA/CA⁷ de IEEE 802.11 avec le mécanisme RTS/CTS (Request-To-Send / Clear-To-Send), les nœuds se mettent à l'état sommeil après qu'ils entendent le paquet RTS ou CTS.

S-MAC apporte une amélioration par rapport au CSMA/CA de la norme 802.11 en termes d'économie d'énergie. Cependant, les messages de synchronisation et les messages RTS/CTS génèrent une surcharge du réseau.

⁷ Proposé par la norme 802.11, Le protocole CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) est une méthode d'accès au canal de transmission. elle utilise un mécanisme d'esquive de collision basé sur un principe d'accusé de réceptions réciproques entre l'émetteur et le récepteur.

- **T-MAC**

Dans le protocole T-MAC [Tijs V. D, K. L, 2003] (Timeout-MAC) chaque nœud se réveille périodiquement pour communiquer avec ses voisins après il dort. Les nœuds communiquent en utilisant le mécanisme RTS (Request-To-Send), CTS (Clear-To-Send), Data, et ACK (Acknowledgement) qui permet d'éliminer les collisions et aussi assurer une bonne communication des paquets. Dans la période active le nœud continue à écouter le canal et potentiellement transmet des données. La période active se termine quand aucun événement d'activation n'est produit durant une période de temps TA .

T-MAC fait passer les nœuds en mode sommeil sans s'être assuré que ses voisins n'ont plus de données à lui envoyer. En effet, les données à envoyer du voisin ont pu être retardées à cause d'un échec d'accès au canal. Ce problème est appelé le sommeil prématuré dans [Tijs V. D, K. L, 2003].

Pour remédier à ce problème, T-MAC propose d'envoyer un FRTS (Future Request To Send) après la réception d'un CTS pour informer la destination de ne pas changer son mode en sommeil après la période de temps TA . Pour éviter une collision entre les données et le FRTS, le nœud qui devait envoyer après le CTS reporte sa transmission pour la durée d'envoi d'un FRTS. Une autre solution est de prendre l'initiative en transmettant un RTS à la réception d'un RTS. Au lieu de répondre par un CTS, le nœud peut décider d'envoyer un RTS pour éviter que le destinataire des messages de ce nœud dorme au bout de TA .

Les résultats ont montré que T-MAC réduit la consommation énergétique jusqu'à 96% par rapport à CSMA/CA de 802.11, et que T-MAC consomme autant que S-MAC sous une forte charge du trafic. En revanche, T-MAC génère plus de trafic de contrôle que S-MAC. Dans S-MAC et T-MAC, les nœuds choisissent leur période de réveil soit aléatoirement, soit de manière qui permet aux nœuds voisins de se réveiller en même temps. Cela induit des retards sur le délai de bout-en-bout.

- **D-MAC**

D-MAC [G. Lu et al., 2004] (Data gathering MAC) propose un séquençement des périodes d'activité qui favorise la collecte d'informations dans une topologie arborescente. Les périodes de réveil des nœuds sont décalées selon leurs positions dans l'arborescence de collecte de données. Les nœuds du même niveau sont synchronisés à se réveiller en même

temps. Les fils d'un nœud accèdent au medium en même temps en utilisant des délais (appelés backoff) aléatoires pour éviter les collisions systématiques. De ce fait, D-MAC sous-estime la probabilité de collisions en supposant que les nœuds fils peuvent se détecter. D-MAC suppose aussi que la durée nécessaire pour envoyer le trafic cumulé dans les nœuds les plus proches de la racine reste inférieur à la durée du cycle d'activité.

c) Les régimes asynchrones

Un protocole sleep/wakeup asynchrone permet à chaque nœud de se réveiller indépendamment des autres, en garantissant que les voisins se chevauchent toujours dans les périodes actives au sein d'un nombre de cycles spécifiés. Aucun échange d'information n'est alors nécessaire entre les nœuds. RAW (Random Asynchronous Wakeup) [Vamsi Paruchuri et al., 2004], AWP (Asynchronous Wakeup Protocol) sont des régimes sleep/wakeup asynchrone.

- AWP (Asynchronous Wakeup Protocole)

Le protocole AWP proposé par Zheng et al. [R. Zheng et al, 2003] a adopté une approche systématique de conception d'un mécanisme de réveil asynchrone pour les réseaux ad hoc. Leur protocole est aussi applicable aux réseaux de capteurs sans fil. Ils conçoivent un protocole de réveil asynchrone (AWP) qui permet de détecter des nœuds voisins en un temps fini sans exiger l'alignement des slots. Le protocole proposé est également résistant aux collisions de paquets et aux variations dans la topologie du réseau.

L'idée de base est que chaque nœud est associé à une fonction de réveil annexe qui est utilisée pour générer un réveil planifié. Il assure que chaque nœud sera en mesure à contacter l'un de ses voisins dans une période de temps limitée.

Toutefois, la latence des paquets induite peut être importante, en particulier dans les réseaux multi-sauts. En outre, il n'arrive jamais que tous les voisins sont activés simultanément. Par conséquent, il n'est pas possible de diffuser un message à tous les voisins.

- RAW (Random asynchrone Wakeup)

RAW [Vamsi Paruchuri et al., 2004] prend une approche différente car il exploite le fait que les réseaux de capteurs sont en général caractérisés par une densité de nœud élevée. Le protocole RAW consiste en la combinaison d'un protocole de routage avec un régime de réveil aléatoire, le paquet est envoyé à l'un des voisins actifs appelé (*forwarding candidate*

set), c'est à dire l'ensemble des voisins actifs qui répondent à un critère prédéfinie. Le régime de réveil aléatoire est extrêmement simple et ne s'appuie que sur des décisions locales. Il est donc bien adapté pour les réseaux avec une topologie qui change fréquemment. D'un autre côté, il n'est pas adapté pour les réseaux clairsemés (*sparse network*). Le protocole RAW ne garantit pas la transmission de paquet à l'intérieur d'une période de temps définie (T), alors qu'AWP le permet.

En fait, l'approche adoptée par les protocoles *à la demande (On demande)* est l'idéale, car elle maximise davantage la durée de vie du réseau parce que les nœuds ne restent actifs que pendant la période requise pour la communication. En outre, il ya seulement un impact très limité sur la latence, car le nœud cible se réveille immédiatement dès qu'il se rend compte qu'il ya un message en attente. Malheureusement, l'adoption d'un tel régime avec une seule radio est presque toujours impossible, parce qu'il peut être appliqué uniquement lorsque la distance entre les nœuds est très courte (quelques mètres). Introduire une radio réveil est une direction plus prometteuse, notamment adaptée à des applications de détection. Toutefois, la radio réveil est coûteuse et généralement elle n'est pas fournie avec les plates-formes de capteurs couramment utilisées. Ainsi, quand une deuxième radio n'est pas disponible ou pratique, d'autres solutions comme les protocoles de rendez-vous programmé et les protocoles de réveil asynchrones peuvent être utilisés.

Les régimes de rendez-vous programmé et les régimes asynchrones diminuent la latence des messages qui transitent entre les nœuds au détriment de l'énergie.

Les régimes du rendez-vous programmé sont commodes, parce qu'ils sont adaptés à l'agrégation de données et supportent la diffusion de trafic. Malheureusement, ils exigent que les nœuds doivent être synchronisés, ce qui est dans certains cas difficile à réaliser ou coûteux.

En outre, les protocoles asynchrones n'ont pas besoin d'une synchronisation précise pour les nœuds du réseau. Ils sont généralement plus faciles à mettre en œuvre et peuvent assurer la connectivité du réseau.

Dans les régimes asynchrones les nœuds ont besoin de se réveiller plus souvent que dans les protocoles de rendez-vous. Par conséquent, les protocoles asynchrones aboutissent généralement à un cycle d'affectation supérieur pour les nœuds du réseau que leurs homologues synchrones.

En raison de leurs applications élargies et leurs propriétés, les protocoles de rendez-vous programmé et les protocoles asynchrones semblent être les solutions les plus prometteuses dans la classe des régimes sleep/wakeup.

Cependant, il ya encore place pour des améliorations sur les techniques exposées ci-dessus. Par exemple, les protocoles de rendez-vous programmé doivent assouplir les hypothèses de la synchronisation d'horloge entre les nœuds. Alternativement, ils pourraient intégrer une solution de synchronisation de l'horloge aussi, ainsi leurs exigences de chronométrage peuvent être garanties sans exiger un protocole séparé. Sur l'autre côté, l'exploitation des informations inter couche (cross layer information) semble être un facteur souvent négligé dans la conception des protocoles asynchrones.

3.6 Conclusion

La durée de vie d'un réseau de capteur est étroitement liée à la vie nodale. Cette dernière dépend fortement de la consommation d'énergie du nœud capteur. Dans ce dernier, l'énergie est consommée en assurant les fonctions suivantes : la capture, le calcul (traitement) et la communication. La communication représente une grande portion de l'énergie totale consommée. Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques approches de conservation d'énergie, proposée dans la littérature, pour les réseaux de capteur sans fil. Après avoir souligné les principaux facteurs de consommation d'énergie.

La première classe des méthodes de conservation d'énergie vise à réduire l'énergie dépensée dans la capture des données, cela se traduit par la suppression des captures inutiles.

La deuxième classe s'intéresse à l'énergie de calcul. Il était montré que l'énergie de calcul peut être réduite par les deux méthodes : DVS et le partitionnement du système.

Dans la troisième classe, nous avons évoqué les méthodes visant à réduire l'énergie consommée en phase de communication. En effet, plusieurs solutions protocolaires proposées partent de l'idée que l'énergie dépensées par la radio en phase de communication est plus élevée que celle due à l'échantillonnage ou au traitement de données. Dans cette optique, plusieurs méthodes en vu le jour soit sous forme de protocole MAC ou bien sous forme de protocoles de routage.

Il reste bien évidemment d'autres techniques de conservation d'énergie. Par exemple les méthodes centrées sur la mobilité des nœuds relais ou bien des puits de données [Giuseppe A

et al., 2008]. Il existe un intérêt croissant pour ce type d'approche car si certaines applications pratiques envisagent des déploiements moins denses, alors pour des raisons d'efficacité et de robustesse, les protocoles de communication peuvent exploiter de façon appropriée la mobilité des nœuds.

Chapitre 4

Les techniques de Contrôle de Puissance : Etat de l'art

4.1 Introduction

Un réseau de capteurs est conçu pour fonctionner le plus longtemps possible, durant des mois voire des années. A cet égard, les protocoles conçus pour les réseaux de capteurs doivent judicieusement suivre un plan énergétique efficace. En fait, comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédent, la transmission des données est la tâche qui consomme le plus d'énergie. Concevoir des unités de transmission de type radiofréquence avec une faible consommation d'énergie est un défi car pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal assez puissant et donc une énergie consommée importante. L'alternative consistant à utiliser de longues antennes n'est pas possible à cause de la taille réduite des micro-capteurs.

Le tableau 4.1 montre les caractéristiques liées à la puissance de transmission pour une interface radio *Chipcon CC1000* [12] largement utilisé dans les plates-formes existantes pour les réseaux de capteurs sans fil.

Transmission (mW)	Réception/idle (mW)	Sommeil
19,8 - 80,1	22,2	0,6

TAB.4.1 – La consommation d'énergie pour Chipcon CC1000 dans les réseaux de capteurs sans fil [12]

On observe dans ce tableau que la puissance de transmission utilisée a un grand impact sur la consommation d'énergie, ce qui offre une possibilité d'économie d'énergie très importante. Pour cette raison les recherches se sont dirigées sur le contrôle et la gestion de la puissance en transmission de la radio.

Le contrôle de la puissance de transmission vise à réduire la puissance de transmission totale du réseau en ajustant la puissance de transmission de chaque nœud capteur. Ce dernier, permet non seulement de réduire l'énergie consommée en transmission par le nœud capteur, mais aussi permet de réduire les interférences et limite le risque de collision entre les communications en minimisant ainsi le nombre de retransmission dû à la perte des paquets. De ce fait, une partie importante de l'énergie sera économisée.

Dans ce présent chapitre nous explorons les méthodes de contrôle de puissance proposées pour les réseaux sans fil d'une façon générale, ensuite d'une façon précise celles proposées pour les réseaux de capteurs sans fil.

Vu la diversité des méthodes de contrôle de puissance de transmission proposées pour les réseaux de capteurs, nous offrons une classification de ces dernières selon quelques critères.

4.2 Les méthodes de contrôle de puissance

4.2.1 Métriques de performance d'une méthode de contrôle de puissance

L'efficacité d'une méthode de contrôle de puissance permet à un réseau de capteurs de mener sa mission jusqu'à la fin et pour une longue durée. Ainsi, on dit qu'une méthode de contrôle de puissance est efficace si elle répond aux propriétés suivantes :

4.2.1.1 Consommation énergétique

L'énergie est considérée comme une ressource précieuse dans les réseaux de capteurs, sa conservation est indispensable pour garantir une longue durée de vie aux réseaux puisqu'il est généralement impossible de recharger les batteries des capteurs. Cette consommation est optimisée quand la puissance de transmission de la radio est réduite.

4.2.1.2 La connectivité

Un des objectifs de mise en œuvre d'un réseau de capteurs est d'avoir une bonne connectivité. Qui permet à chaque nœud d'atteindre les autres nœuds du réseau via un ou plusieurs sauts.

Cette connectivité dépend fortement de la valeur du rayon de transmission, qui lui-même dépend de la puissance de transmission de la radio.

4.2.1.3 Qualité du lien

La mesure de la qualité du lien diffère d'une méthode à une autre. Il existe plusieurs métriques de mesure de la qualité du lien : une unité de radio traditionnelle ou un émetteur/récepteur fonctionnant à des fréquences faibles tels que CC1000 [13] et TR1000 [14] qui fournissent le RSSI (*Radio Signal Strength Indication*) comme mesure de la qualité du lien, tandis que les derniers modèles tels que CC2420 [15] et EM2420 [16] ont une métrique supplémentaire, LQI (*Link Quality Indicator*). Généralement, RSSI est une mesure de la puissance du signal d'un paquet entrant alors que LQI est une mesure du taux d'erreur de la puce et il est étroitement lié au SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). Le SNR est un rapport de la puissance du signal reçu sur le bruit de fond. En outre, le PRR (*Packet Reception Rate*) [K. Srinivasan and P.L., 2006] peut être utilisé comme métrique de performance.

4.2.2 Les méthodes de contrôle de puissance dans les réseaux sans fil

Nous présentons dans cette section quelques techniques de contrôle de puissance proposées pour les réseaux sans fil.

4.2.2.1 Power Management for Throughput Enhancement in Wireless Ad-Hoc Networks [T.A. ElBatt, 2000]

Cette méthode est conçue pour les réseaux Ad hoc avec faible mobilité. Plusieurs effets de la variation de la puissance de transmission sur la consommation moyenne de l'énergie et le débit de bout en bout du réseau ont été étudiés. Les auteurs ont étudié le compromis entre la réduction de la puissance en transmission et l'augmentation du nombre de sauts intermédiaires. Transmettre des données en utilisant une grande puissance de transmission peut réduire le nombre de sauts utilisés pour atteindre la destination, cependant des interférences sont susceptibles de se produire. De plus, chaque nœud dispose d'une batterie limitée en énergie, donc une communication multi-sauts est nécessaire.

Dans la phase *connectivity setup*, chaque nœud diffuse un message de balise en utilisant la puissance de transmission maximale pour la découverte de son voisinage.

Dans cette phase, un protocole MAC sans contention est utilisé comme méthode d'accès. Puis la table de connectivité est construite contenant l'identifiant du nœud (*Node ID*), les

identifiants des voisins (*Neighbor ID*), et la puissance de transmission. A la réception de chaque message de balise, le nœud récepteur enregistre les puissances de transmission reçues et calcule une moyenne à partir de celles-ci.

La puissance de transmission reçue est supposée être proportionnelle à $1/d^4$ (d est la distance entre l'émetteur et le récepteur). La moyenne des puissances reçues est utilisée pour sélectionner les N nœud les plus proches qui ont la moyenne supérieure. Ces informations sur les N nœuds seront ajoutées par la suite à la table de connectivité. Ensuite chaque nœud adapte sa puissance de transmission pour chacun de ses voisins directs (voisins à un saut). Et il met à jour la table de connectivité. Puis il diffuse un paquet de signalisation, sur le canal de signalisation, contenant sa connectivité locale. Ainsi, chaque nœud stocke l'information sur la topologie globale du réseau.

Après l'obtention de l'information sur la topologie globale du réseau, un algorithme de routage MPR (*the Minimum Power Routing*) est utilisé pour la découverte du plus court chemin entre la source et la destination où la puissance de transmission est utilisée comme poids des liens. Puisque ce protocole est conçu pour les réseaux Ad Hoc mobile, deux protocoles de mise à jour des tables de connectivité sont utilisés.

Le premier est un protocole de mise à jour périodique PUP (*Periodic Update Protocol*) et le second est un protocole de mise à jour quasi-périodique QPUP (*The Quasi-Periodic Update Protocol*) ce dernier suppose une faible mobilité des nœuds. Cependant, ce protocole n'est pas adapté pour les réseaux à grande échelle, car chaque nœud doit maintenir une table sur la topologie globale du réseau.

4.2.2.2 An Energy-Efficient Power Control Approach for WLANs [J.P. Ebert, 2000]

Dans [J.P. Ebert, 2000] les auteurs ont proposé un mécanisme de contrôle de puissance pour les réseaux locaux sans fil (WLANs). Ce protocole ajuste la puissance en fonction de la longueur du paquet. Le but principal est de minimiser la puissance de transmission mais cela peut induire à un taux d'erreur des bits plus élevé (bit error rate). Le protocole choisit une puissance de transmission en fonction de la taille des paquets à transmettre au niveau MAC.

Une analyse du bilan de lien a été menée afin de déterminer la puissance de transmission requise en prenant en compte plusieurs effets tels que : le bruit thermique (la puissance observée à un récepteur quand aucun nœud n'est entrain de transmettre), l'affaiblissement de

propagation¹ (*path-loss*), le rapport signal-sur-bruit² (*Signal-to-noise ratio*), le gain de l'antenne pour l'émetteur et le récepteur et le taux d'erreur des bits. Il calcule la puissance de transmission nécessaire par rapport à un certain taux d'erreur de bit. En outre, les changements dynamiques de taux d'erreur de bits sont déterminés en utilisant un modèle incluant les bons et les mauvais états. Selon les résultats de simulation obtenus, la puissance optimale correspond à la plus faible énergie de transmission d'un bit qui varie selon la taille du paquet.

4.2.2.3 Local Information No Topology (LINT) and Local Information Link-State Topology (LILT) [R. Ramanathan and R.R, 2000]

Ces deux méthodes ont été conçues pour les réseaux mobiles sans fil. Elles sont conçues pour ajuster de manière adaptative la puissance de transmission des nœuds afin de maintenir une topologie connectée en réponse aux changements de topologie. Le protocole ajuste la puissance de transmission de chaque nœud en fonction d'un nombre souhaité de voisins. Deux seuils ont été proposés, le premier *seuil 1* représente le degré élevé des nœuds voisins et le deuxième *seuil 2* représente le degré faible des nœuds voisins. Si le degré actuel des nœuds est inférieur à *seuil 2* la puissance de transmission sera incrémentée, et si le degré actuel est supérieur à *seuil 1*, la puissance de transmission sera diminuée.

La différence entre LINT et LILT, est que LILT nécessite des informations supplémentaires sur la topologie globale du réseau. Ce genre d'informations est disponible dans certain protocole de routage.

Le protocole LILT est facile à mettre en œuvre car il utilise des informations sur la topologie qui sont disponibles dans le protocole de routage. Cependant, il n'est pas assez générique pour fonctionner avec tous les protocoles de routage existants.

4.2.2.4 Mécanisme de contrôle de topologie orienté QoS [X. Jia et al., 2004]

Dans [X. Jia et al., 2004] un mécanisme de contrôle de topologie orienté QoS est proposé. Il permet de satisfaire les besoins de qualité de service en minimisant la puissance de transmission des nœuds mobiles. Les paramètres étudiés sont le délai (en termes de nombre de

¹ L'affaiblissement du signal entre l'antenne d'émission et celle de réception. Cet affaiblissement est dû à la dispersion de la puissance, mais également aux obstacles rencontrés sur le chemin : édifices, montagnes, précipitations et autres bloquant le signal.

² Le rapport signal/bruit appelé encore rapport signal à bruit, permet de mesurer la qualité d'un canal de transmission. C'est un nombre sans unité qui est d'autant plus grand que le bruit est négligeable.

sauts) et le taux d'acheminement des paquets. Dans ce cas, les demandes d'applications temps réel peuvent être assurées et la durée de vie du réseau prolongée. Dans cette étude deux cas sont considérés :

- les paquets d'un trafic peuvent être acheminés à travers plusieurs routes.
- les paquets d'un trafic doivent emprunter la même route de la source à la destination.

Dans le premier cas, le problème est formulé comme un problème de programmation linéaire mixte en tenant compte de la bande passante seulement.

Dans le deuxième, il est aussi formulé comme un problème de programmation linéaire mixte où le délai de bout en bout et la bande passante sont considérés.

4.2.3 Les méthodes de contrôle de puissance dans les réseaux de capteurs sans fil

Les protocoles de contrôle de puissance pour les réseaux de capteurs ont été largement étudiés dans la littérature. Vu leurs diversité nous proposons une classification de ces derniers en s'appuyant sur quelques critères. Dans chaque classe, nous mettons quelques méthodes les plus pertinentes dans la littérature. La figure ci-dessous résume la classification proposée.

La classification était faite selon le mécanisme utilisé pour l'ajustement de la puissance en transmission : Ajuster la puissance en transmission en se basant sur les informations topologique, ou en se basant sur la qualité des liens.

- Protocole basé sur les informations topologiques

Les protocoles qui appartiennent à cette catégorie ajustent la puissance de transmission pour maintenir une topologie ou un nombre de voisins souhaités. La puissance de transmission est ajustée dynamiquement de sorte que la topologie du réseau atteigne certaines propriétés de connectivité et que la consommation d'énergie des nœuds soit optimisée.

- Protocole basé sur la qualité des liens

Le but commun entre les méthodes proposées dans cette catégorie est d'ajuster dynamiquement la puissance en transmission tout en maintenant une bonne qualité de lien entre les nœuds. Une bonne qualité de lien est définie comme avoir un lien entre l'émetteur et le récepteur qui fournit une livraison réussie des données. Il existe plusieurs métriques de

mesure de qualité de liens qui se diffèrent d'un protocole à un autre : tel que le RSSI (*Radio Signal Strength Indication*), LQI (*Link Quality Indicator*) et PRR (*Packet Reception Rate*).

Nous présentons dans ce qui suit une panoplie de méthodes proposées dans chaque catégorie. Figure 4.1.

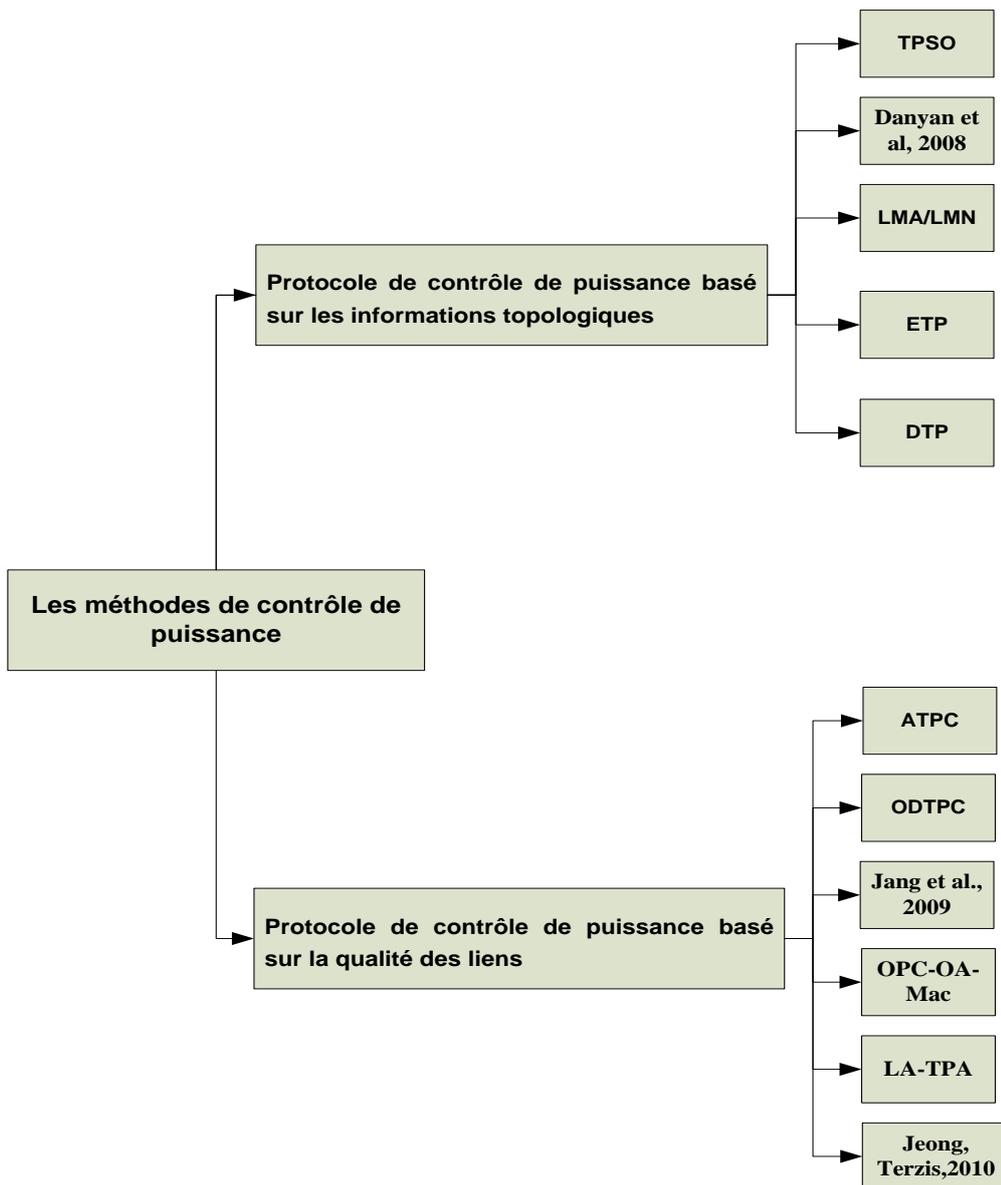


FIG.4.1 – Classification des méthodes de contrôle de puissance pour les réseaux de capteurs sans fil

4.2.3.1 Protocole de contrôle de puissance basé sur les informations topologiques

A. Local Mean Algorithm (LMA) and Local Mean of Neighbours Algorithm (LMN) [Kubisch et al., 2003]

Kubisch et al. [Kubisch et al., 2003] proposent deux approches locales et distribuées LMA (*Local Mean Algorithm*) et LMN (*Local Mean of Neighbours Algorithm*) qui visent à ajuster la puissance de transmission tout en respectant la qualité du lien.

LMA et LMN partent de l'hypothèse que l'utilisation de connaissance globale sur les conditions du réseau n'est pas applicable pour les réseaux de capteurs. Ces deux approches utilisent pour chaque nœud dans le réseau une puissance de transmission différente, et chaque nœud utilise la même puissance de transmission pour chacun de ces voisins.

Le principe de l'approche LMA est comme suit : au début tous les nœuds commencent avec la même puissance de transmission, ensuite ils envoient périodiquement un message à leurs voisins, appelé life message, contenant leurs propres identifiants. Les nœuds récepteurs du message, envoient un acquittement (ACK) au nœud expéditeur contenant son adresse (adresse expéditeur), afin de l'informer de la bonne réception du message. Après la réception des acquittements, le nœud compte leurs nombres, si le nombre d'acquiescement est inférieur à un seuil « *NodeMinThresh* » minimum le nœud augmente sa puissance de transmission sans dépasser un seuil maximum fixe. Dans le cas contraire, il diminue sa puissance de transmission mais pas en dessous d'un seuil minimum fixe. Si le nombre d'acquiescement est égal à « *NodeMinThresh* » la puissance ne sera pas changée. Cet algorithme est périodique et ne nécessite pas une synchronisation entre les nœuds car la périodicité est locale au nœud.

L'approche LMN est similaire à celle du LMA dans la manière d'ajuster la puissance. Dans cette approche l'ACK, en plus de l'adresse de l'expéditeur, il va contenir l'adresse du récepteur (celui qui va envoyer l'ACK). Après la réception des ACKs le nœud calcule une valeur moyenne du nombre des voisins de ses propres voisins, qui sera utilisée par la suite pour ajuster la puissance de transmission. Cette approche permet une connaissance sur la connectivité des voisins du nœud expéditeur aux autres nœuds.

Les deux méthodes LMA et LMN peuvent ajuster efficacement la puissance de transmission vu qu'elles se basent sur des informations locales de chaque nœud. Cependant, ils ne

prennent pas en considération les changements topologiques dus à l'épuisement ou la mobilité des nœuds.

B. Energy-Saving Routing Protocol for Wireless Sensor Networks [Danyan L et al., 2008]

Dans [Danyan L et al., 2008] , un protocole de routage pour l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs est proposé. Ce protocole utilise une méthode de contrôle de puissance de transmission pour réduire au maximum la consommation d'énergie. Chaque nœud capteur, avant d'envoyer le premier paquet, diminue sa puissance d'émission pour atteindre uniquement le voisin à un saut le plus éloigné. Après cela, le nœud initie un processus de découverte de route à la demande pour avoir des informations de routage qui ne sont pas disponibles dans sa table de routage. Si à un moment donné, l'énergie restante du nœud atteint un certain seuil, le nœud diminue encore sa puissance de transmission dans le but de minimiser encore plus l'énergie consommée, mais sans dégrader la couverture du réseau.

C. A transmission power self-optimization technique for WSN (TPSO) [F. Lavratti et al., 2012]

Dans [F. Lavratti et al., 2012] des expériences sont menées pour montrer l'impact du bruit sur la communication dans les réseaux de capteurs sans fil. En se fondant sur ces expériences, ils ont proposé un protocole de contrôle de puissance TPSO.

Les auteurs cherchent à réduire la consommation d'énergie et en même temps assurer une bonne connectivité. Pour cela, la puissance d'émission est ajustée individuellement pour chaque nœud de capteur en tenant compte de la $WSN E_f$, la $WSN E_f$ est calculée en utilisant le E_f spécifique de chaque nœud où le E_f représente le nombre de messages reçus par la station de base par rapport au nombre estimé de messages envoyés par les nœuds .

Ce protocole adopte le concept de surveillance par session (*monitoring session*), au début de chaque session, les données sont envoyées formant un point de contrôle. La station de base calcule la $WSN E_f$ et E_f associé à chaque nœud au cours de la session. Après cela, il envoie à chaque nœud son E_f spécifique afin d'ajuster la puissance d'émission. Le nœud augmente la puissance d'émission lorsque le bruit est trop élevé. Inversement, si le bruit est faible, on diminue la puissance d'émission.

D. Global solution with equal transmission power (ETP) [Kubisch et al., 2003]

Cet algorithme ETP (*The Equal Transmission Power*) attribue une puissance de transmission uniforme à tous les nœuds du réseau, mais il choisit la valeur minimale qui assure un réseau entièrement connecté. Pour trouver la puissance minimale ces opérations sont exécutées comme suit:

- Parmi les paires de nœuds qui ne sont pas encore connectées, choisir la paire de nœuds avec la plus petite distance.
- Ajuster la puissance de transmission des autres nœuds du réseau à la puissance de transmission qui permet de connecter ces deux nœuds.
- Vérifier la connectivité du réseau résultant, si ce dernier est connecté la puissance minimum est trouvée.

Cette puissance de transmission est la valeur optimale pour un réseau de capteurs où tous les nœuds utilisent le même niveau de puissance de transmission. Cet algorithme utilise des informations globales sur la topologie du réseau. Ainsi, ce n'est pas évident de mettre en œuvre un algorithme local lui correspondant qui permet d'atteindre les mêmes résultats

E. Global solution with diverse transmission power (DTP) [Kubisch et al., 2003]

Cet algorithme crée un réseau connecté mais n'attribue pas la même valeur de puissance de transmission à tous les nœuds du réseau. Au contraire il cherche à trouver, individuellement, la puissance de transmission minimale pour chaque nœud. L'algorithme fonctionne comme suit :

- Parmi les paires de nœuds qui ne sont pas encore connectées, choisir la paire de nœuds avec la plus petite distance.
- Ajuster la puissance de transmission de ces deux nœuds à la puissance de transmission qui permet de les connecter.
- Vérifier la connectivité du réseau résultant, si ce dernier est connecté la puissance minimum est trouvée.

Cet algorithme réduit la consommation d'énergie de l'ensemble du réseau, mais il peut produire des liens de communication asymétriques.

4.2.3.2 Protocole de contrôle de puissance basé sur la qualité des liens

A. Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks (ATPC) [S. Lin et al., 2006]

ATPC (*an adaptive transmission power control algorithm for wireless sensor networks*) [S. Lin et al., 2006] , la conception de cette approche à été faite en se basant sur des résultats empiriques des expériences faites sur trois sites différents (un champ d'herbe, un parking de stationnement et un couloir). Les objectifs principaux de ce protocole sont :

1. Trouver pour chaque nœud dans le réseau le niveau de puissance de transmission minimum qui lui permet une bonne qualité des liens avec ses nœuds voisins, pour traiter l'impact spatial.
2. Changer dynamiquement le niveau de puissance de transmission entre chaque paire de nœuds, pour traiter l'impact temporel.

Les expériences ont été menées durant une longue période mais raisonnable, ces dernières ont permis une bonne compréhension de l'impact spatiotemporel sur la communication sans fil et aussi la relation entre la qualité des liens et la puissance de transmission.

Après avoir eu ces résultats empiriques un modèle est construit au niveau de chaque nœud pour chacun de ces voisins. Ce modèle représente la corrélation entre la puissance de transmission et la qualité des liens. En s'appuyant sur ces modèles, ATPC ajuste la puissance de transmission pour chaque paquet transmis en se basant sur le changement de la qualité des liens, ce changement reflète le changement de l'environnement. Afin de pouvoir contrôler les changements dynamiques dans la qualité des liens au fil du temps, un algorithme de rétroaction léger (*a lightweight feedback*) a été introduit. La figure 4.2 montre l'idée principale du protocole ATPC.

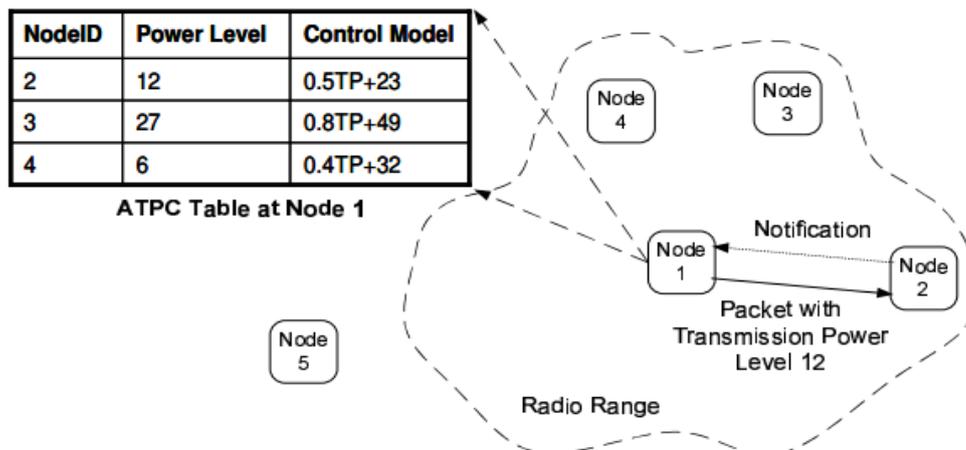


FIG.4.2 – la conception par paire d'ATPC [S. Lin et al., 2006]

La table de voisinage est maintenue au niveau de chaque nœud, elle contient les niveaux de puissance de transmission appropriés que chaque nœud doit utiliser pour ses nœuds voisins et les paramètres pour les modèles prédictifs.

ATPC assure la bonne qualité des liens. Cependant, il s'appuie sur la collecte d'informations sur le canal avant de décider sur le niveau de puissance de transmission. Cette information change fréquemment lorsque les nœuds sont mobiles. Donc, cet algorithme ne peut pas être appliqué pour les réseaux de capteurs mobiles. En outre, il génère une surcharge (*overhead*) dans la phase d'initialisation.

B. On Demand Transmission Power Control algorithm (ODTPC) [Kim et al., 2008]

Ce protocole permet à chaque nœud d'ajuster dynamiquement sa puissance de transmission au fil du temps et de garder une bonne qualité de lien tout en réduisant la surcharge induite par la phase d'initialisation dans laquelle la puissance de transmission est déterminée. Cet algorithme contient deux phases: large -scale transmission power control (L-TPC) et small-scale transmission power control (S-TPC) comme montré dans la figure 4.4.

- *large -scale transmission power control (L-TPC)*

Dans cette phase, quand le nœud a une donnée à transmettre il cherche dans sa table de voisinage dans le but de trouver la puissance optimale pour atteindre le récepteur.

Si cette dernière n'existe pas, le nœud transmettra le paquet en utilisant la puissance maximale P_{max} . Le récepteur mesure le RSSI correspondant au paquet reçu et calcule

approximativement la puissance de transmission appropriée ${}_{tx}P_{R \rightarrow S}$ par rapport au RSSI et la puissance de transmission qui est indiquée par le domaine TPL comme montré dans la figure 4.3, la puissance est calculée comme suit :

$${}_{tx}P_{R \rightarrow S} = {}_{tx}R^{\text{approximated}}_{R \rightarrow S} + M \quad (4.1)$$

M est une marge utilisée pour assurer une bonne communication entre l'émetteur et le récepteur vu que la détermination de la puissance de transmission à partir du RSSI est difficile [D. Son et al., 2004] . Ensuite, le récepteur transmet cette valeur dans un paquet ACK (accusé de réception) en utilisant la puissance approximative calculée. Quand le nœud émetteur reçoit l'ACK, il calcule la puissance appropriée ${}_{tx}P_{S \rightarrow R}$ en fonction du RSSI et la marge M.

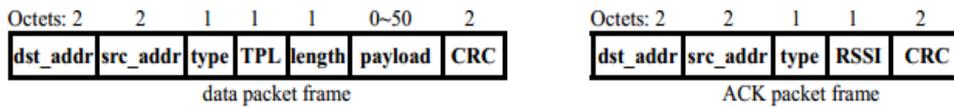


FIG.4.3 – Format de la trame MAC utilisée dans ODTPC [Kim et al., 2008]

- *Small-scale transmission power control (S-TPC)*

La prochaine fois, quand le nœud a une donnée à transmettre au même récepteur, il utilise la puissance de transmission approximative déjà calculée, et le récepteur répond par un paquet ACK contenant le RSSI mesuré. Si le RSSI est inférieur à un seuil minimum TH_{Low} , le nœud émetteur augmente sa puissance de transmission dans une étape fixe L_{step} . Dans le cas contraire, si le RSSI est supérieur à un seuil maximum TH_{upper} , l'émetteur diminue sa puissance de transmission dans une étape fixe. Si la limite maximum d'échec de transmission est atteinte, le niveau de puissance de transmission est augmenté dans une grande étape.

Dans la phase S-TPC, chaque nœud détermine précisément le niveau de puissance de transmission minimum qui assure une bonne qualité du lien. Elle maintient également, d'une manière dynamique, le niveau de puissance de transmission au fil du temps.

La figure 4.4 montre les deux phases du protocole ODTPC

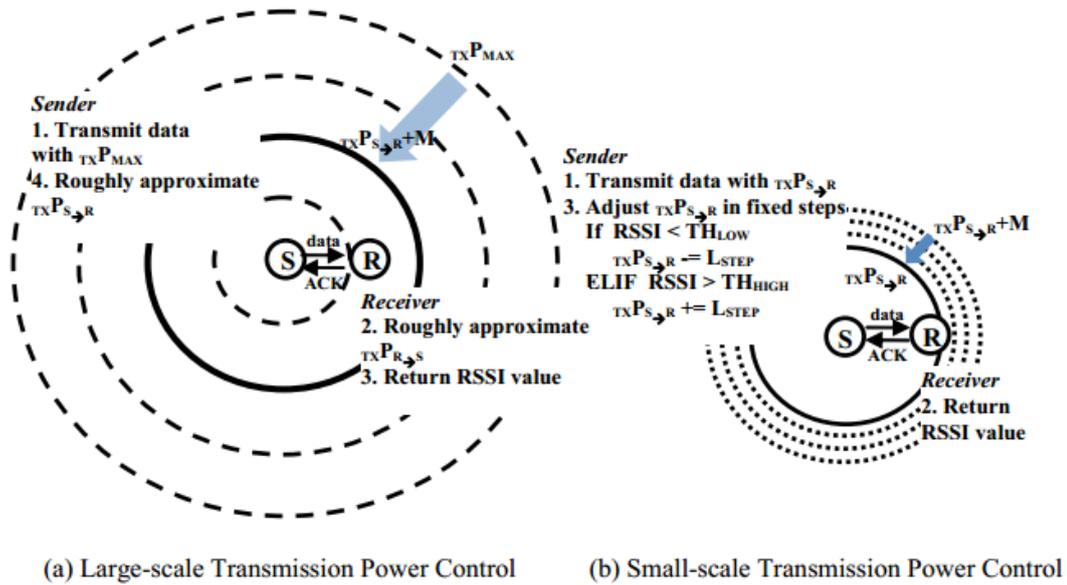


FIG.4.4 – Aperçu sur la conception d'ODTPC [Kim et al., 2008]

Dans ce protocole, l'émetteur peut rapidement trouver le niveau de puissance de transmission optimale parce qu'il n'existe pas une phase initiale pour chercher la puissance optimal comme celle existante dans ATPC. Par ailleurs, cet algorithme n'as pas besoin d'un calcul complexe et aussi il n'occupe pas beaucoup d'espace mémoire à son exécution.

C. A distributed power control algorithm for wireless sensor network [Jang et al., 2009]

Les auteurs de [D. Son et al., 2004] proposent un algorithme de contrôle de puissance distribué pour les réseaux de capteurs sans fil. La conception de cet algorithme est basée sur des expériences faites dans le but d'étudier la relation entre la qualité de lien et la puissance de transmission. Il consiste en deux phases :

- La phase initiale dans laquelle chaque nœud détermine le niveau de puissance de transmission pour chacun de ses nœuds voisins.
- La phase de maintien : dans cette phase, les nœuds ajustent dynamiquement le niveau de la puissance de transmission selon la moyenne de la puissance du signal reçu RSSI (*received signal strength indicator*) et l'indicateur de qualité de lien LQI (*link quality indicator*).

Cet algorithme prolonge la durée de vie du réseau et, en même temps, il permet d'améliorer le taux de livraison de paquets. Cependant, il n'est pas appliqué à un réseau de capteurs sans fil mobile.

D. Optimal Power Control MAC with Overhearing Avoidance (OPC-OA MAC) [M. Ramakrishnan and P. V, 2009]

Ce protocole est une extension de CSMA/CA avec paquet de contrôle RTS/CTS (*Request-To-Send / Clear-To-Send*). Ce protocole intègre un mécanisme de contrôle de puissance.

Dans un protocole CSMA/CA simple, le nœud vérifie si le canal de transmission est libre ou pas. S'il est libre, il envoie un paquet RTS. A la réception de ce paquet par le nœud récepteur, ce dernier répond par un paquet CTS. Les messages de contrôle sont utilisés pour éliminer le problème du terminal caché et exposé.

Dans OPC-OA-MAC le mécanisme de contrôle de puissance est inclus comme suit :

- Le nœud émetteur vérifie le canal de transmission, si ce dernier est libre il vérifie sa table de voisinage pour trouver la puissance optimale. S'il ne la trouve pas, alors le RTS est transmis en utilisant la puissance maximale. Dans le cas contraire, le RTS sera transmis en utilisant la puissance optimale.
- A la réception du RTS, le récepteur prévu mesure le RSSI qui sera utilisé par la suite pour calculer le rayon de transmission (d). Après la distance sera ajoutée dans la table de voisinage.
- Si le rapport de signal- bruit (SNR) est supérieur au seuil de SNR, la puissance d'émission optimale sera choisie en fonction du modèle radio.
- Le récepteur répond par l'envoi d'un (CTS) le destinataire prévu envoie CTS à l'expéditeur avec la puissance optimale estimée et ce paquet contient le niveau de puissance auquel le récepteur le transmet.
- Les autres nœuds recevant le RTS qui ne leurs sont pas destinés vont à l'état de sommeil pour le temps de transfert des paquets CTS/DATA/ACK dans le but d'éliminer l'écoute abusive.
- L'émetteur change aussi son niveau de puissance et transmet le paquet de données à une puissance réduite qui dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur. L'émetteur met à jour également sa table de voisinage.

Dans ce protocole tous les paquets ont un champ qui indique le niveau de puissance de transmission utilisé pour le transmettre.

Ce type de contrôle de puissance diminue non seulement la consommation d'énergie mais aussi les interférences. Par ailleurs, il facilite l'utilisation spatiale du canal de transmission.

Ce protocole améliore ODTPC en termes d'énergie consommée, cependant il est conçu pour les réseaux de capteurs statiques.

E. Power Assignment Method for Wireless Sensor Networks (LA-TPA) [Jin Wang et al., 2012]

C'est une méthode adaptative locale de contrôle de puissance qui a pour but l'amélioration de l'efficacité énergétique et la connectivité du réseau. Dans cette méthode, les auteurs s'appuient sur le *path-loss* du lien pour assigner la puissance de transmission.

Le protocole est conçu pour exécuter un ensemble d'opérations et répondre à un ensemble d'événements comme suit :

- ***L'événement de fin de placement (The placement finish event)***

Cet événement peut être déclenché par un temporisateur pré-réglé. Quand le délai défini par le temporisateur expire, cela signifie que le déploiement du réseau est terminé.

Après la fin du déploiement, chaque nœud dans le réseau diffuse un message Hello en utilisant la puissance de transmission maximale. Le message Hello contiendra l'identifiant du nœud (Id) et la puissance maximale utilisée.

- ***L'événement de réception du message Hello (The Hello message receive event)***

A la réception du message Hello, le nœud récepteur calcule le *path-loss* du lien, par la suite il le stocke en mémoire.

- ***L'événement de fin de découverte de voisinage (The neighbor discovery finish event)***

Cet événement aussi peut être déclenché par un temporisateur pré-réglé, Quand le délai défini par le temporisateur expire, cela signifie que le nœud a reçu les messages Hello de tous ses voisins physiques. Puis le nœud calcule un ordre total de tous ses voisins physiques en fonction du *path-loss* des liens. Ensuite, le nœud diffuse la valeur de l'ordre calculé à tous les voisins physiques.

- ***L'événement de réception de l'ordre total (The total order receive event)***

A la réception du message contenant l'ordre total, le nœud stocke la valeur de cet ordre en mémoire. Quand le nœud reçoit l'ordre de tous ses voisins physiques, il sélectionne un ensemble de nœuds parmi ses voisins physiques pour former un ensemble logique.

- *L'événement d'établissement de la structure logique (The logical structure establish event)*

Quand le temporisateur qui représente l'événement d'établissement de la structure logique expire, le nœud sélectionnera la puissance de transmission nécessaire qui peut couvrir juste l'ensemble des voisins logiques.

- *L'événement de changement de l'ensemble des voisins logiques (The logical neighbor set change event)*

Cet événement est généralement produit par la mort des vieux nœuds ou le déploiement de nouveaux nœuds. Dans le cas d'un réseau mobile, cet événement est causé par la mobilité des nœuds qui mènent à des changements dans l'ensemble logique des voisins.

Quand cet événement se produit, les nœuds définissent un délai de temporisation aléatoire (*back-off*). Si le nœud reçoit un message de connexion avant l'expiration du délai *back-off*, il accepte l'invitation. Dans le cas contraire, le nœud diminue le coefficient de contrôle d'énergie avec un pas de 0.1 et il sélectionne de nouveau ses voisins logiques. Cette étape est répétée jusqu'à que l'ensemble logique des voisins augmente ou atteigne une valeur minimum. A la fin, le nœud diffuse un message de connexion à ses voisins logiques.

F. Power Control for Mobile Sensor Networks: An Experimental Approach [JeongGil K and A.T,2010]

Le but des méthodes de contrôle de puissance de transmission est de fournir de façon fiable les paquets avec une consommation d'énergie minimale et un minimum d'interférence.

En outre, cette méthode de contrôle de puissance a les objectifs supplémentaires suivants :

- La méthode doit s'adapter rapidement au changement de qualité de lien causés par la mobilité ou des changements dans l'environnement.
- Pour la même raison, les anciennes informations sur la qualité des liens doivent être purgées pour éviter la pollution des estimations actuelles sur la puissance de transmission.
- Chaque nœud doit définir sa puissance de transmission.
- Enfin, étant donné les contraintes des nœuds capteurs, la méthode doit être économe en termes de mémoire et d'énergie.

Cette méthode est une méthode expérimentale, les auteurs ont fait des expériences pour montrer l'avantage du contrôle de puissance de transmission dans un réseau de capteurs sans fil mobile. Les tests ont été réalisés dans un environnement extérieur et intérieur. Comme montré dans la figure 4.5.



FIG. 4.5 – Aperçu graphique des environnements de test extérieur et intérieur [JeongGil K and A.T,2010]

Ils considèrent un nœud mobile qui se déplace à la vitesse ~ 5 km / h ou $\sim 1,4$ mètres /seconde) et il émet un paquet toutes les 256 ms. Un nœud fixe enregistre chaque paquet reçu avec succès avec son temps de réception. Le nœud mobile se déplace le long d'une trajectoire déterminée, indiquée par la ligne jaune de la figure 4.5. Ils ont choisi ce taux de transmission pour faire en sorte que, statistiquement un nombre suffisant de paquets arrive au nœud fixe.

Ils ont supposé que le nœud stationnaire n'est pas le récepteur prévu du nœud mobile, un seul récepteur non concerné est utilisé pour mesurer de façon empirique le taux d'interférence. La figure 4.6 trace la réception des paquets par le récepteur non concerné pour différente puissance de transmission par rapport à la distance parcourue par le nœud mobile.

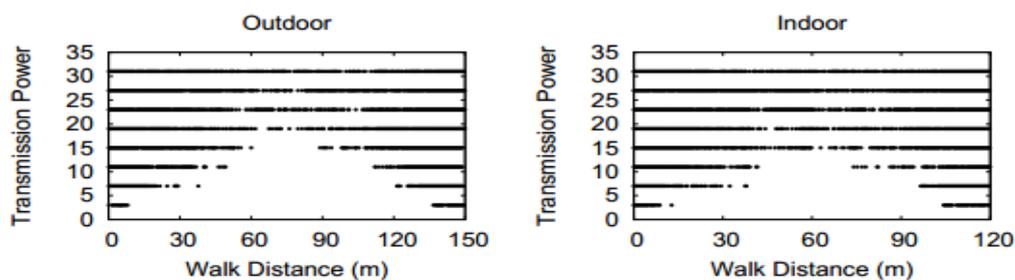


FIG. 4.6 – La réception des paquets au niveau du récepteur non concerné pour les deux environnements, extérieur et intérieur [JeongGil K and A.T,2010]

Il est évident que le niveau de puissance de transmission modifie de manière significative le nombre des paquets reçus. D'autres expériences ont été faites pour mesurer l'impact de la mobilité sur le RSSI également comme montré dans la figure 4.7.

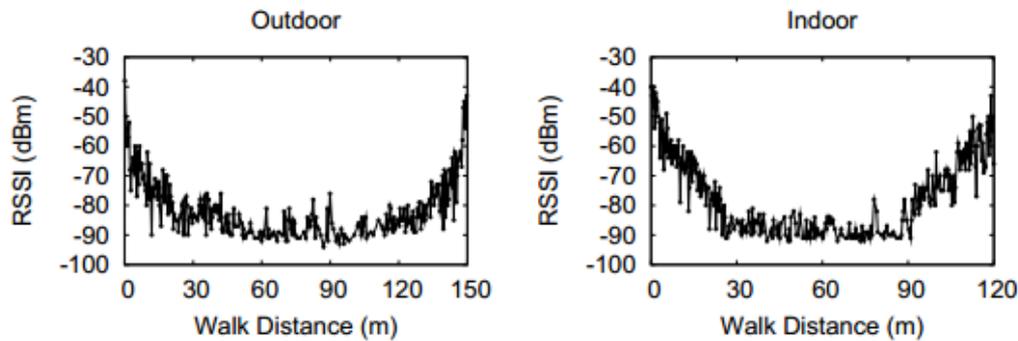


FIG. 4.7 – La variation du RSSI dans un environnement extérieur et intérieur [JeongGil K and A.T, 2010]

Le nœud mobile transmet les paquets au nœud statique en utilisant la puissance de transmission maximale (0 dBm). Le récepteur est situé au début du chemin du nœud mobile. Il a été observé que la variation du RSSI est importante quand la mobilité est présente.

En se basant sur toutes ces expériences deux méthodes ont été proposées : *a light-weight adaptive transmission power control scheme* et *an enhanced scheme for radios*

- *a light-weight adaptive transmission power control scheme*

Cette méthode utilise un sondage actif pour ajuster la puissance de transmission en fonction des pertes de paquets. Lorsque la transmission de paquets n'est pas réussie, le nœud retransmet le paquet en utilisant le niveau suivant de puissance le plus élevé.

- *an enhanced scheme for radios*

Cette méthode ajuste la puissance de transmission en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Lorsque la distance de ces derniers est assez proche, la puissance de transmission est diminuée immédiatement à un niveau de puissance prédéfini.

4.3 Conclusion

Dans un réseau Ad hoc sans fil et plus précisément un réseau de capteurs, les nœuds coopèrent pour répondre aux besoins du réseau. Etant donné que le nœud capteur fonctionne à

l'aide d'une batterie qui représente sa source d'énergie et qui a une durée de vie limitée, un tel réseau sera contraint par la puissance de transmission.

Les nœuds capteurs ont généralement la capacité d'ajuster leurs puissances de transmission et par la suite modifier le secteur de la connectivité et aussi la couverture. En effet, le contrôle de puissance de transmission permettrait de réduire significativement la consommation d'énergie et ainsi augmenter la durée de vie du réseau. Cependant, l'ajustement de la puissance de transmission peut avoir des impacts sur la topologie du réseau tel que la perte de connectivité et aussi peut altérer la qualité de lien. De là, les nœuds doivent ajuster leurs puissances de transmission tout en maintenant les contraintes de la topologie et aussi la qualité du lien.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une panoplie de méthodes de contrôle de puissance proposées dans les réseaux sans fil et plus précisément celles proposées pour les réseaux de capteurs sans fil.

Les méthodes de contrôle de puissance de transmission proposées pour les réseaux de capteurs sans fil sont très variées, en se basant sur les métriques de performance, nous les avons classées en deux grandes classes : les méthodes de contrôle de puissance basées sur les informations topologiques et les méthodes basées sur la qualité des liens.

Les méthodes appartenant à la première classe ajustent leurs puissances de transmission tout en maintenant la contrainte topologique telle que la connectivité du réseau. Tandis que celles qui appartiennent à la deuxième classe, adaptent leurs puissances de transmission en tenant compte de la qualité du lien.

Chapitre 5

Contributions à la conservation d'énergie pour réseaux de capteurs statiques et mobiles

5.1 Introduction

La préservation d'énergie constitue un défi majeur pour les applications de surveillance dans les réseaux de capteurs sans fil. Chaque nœud capteur consomme un montant de la batterie pour la détection et un montant pour la réception/transmission des données détectées de/vers d'autres nœuds du réseau. L'énergie consommée par le module radio représente la plus grande partie de l'énergie totale consommée. A cet égard, de nombreux travaux traitent ce problème en cherchant à optimiser la consommation d'énergie produite par ce dernier. En effet dans cette thèse nous proposons des méthodes visant à optimiser l'énergie dépensée par la radio.

Dans ce présent chapitre, nous présentons nos contributions dans le cadre de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Trois contributions sont présentées.

Notre première contribution consiste à proposer une méthode de contrôle de puissance pour les réseaux de capteurs mobiles. Elle vise à réduire l'énergie dépensée lors de la transmission des données sans dégrader la connectivité du réseau en adaptant la puissance de transmission de la radio. Cette méthode sera implémentée dans la couche radio.

La deuxième contribution est également proposée pour les réseaux de capteurs mobiles, plus précisément le réseau Zebrantet. Cette contribution s'étale vers la couche MAC, elle consiste à proposer une stratégie pour contrôler l'état du module radio. Dans ce contexte, deux méthodes probabilistes ont été proposées qui ont pour but la minimisation de l'énergie et aussi le retard moyen de bout-en-bout.

La troisième contribution quant à elle, est conçue pour les réseaux de capteurs statiques. Nous proposons une méthode de contrôle de la puissance de transmission et du maintien de la connectivité.

Les méthodes proposées ont été comparées avec des méthodes similaires proposées dans la littérature. Pour cela, différentes simulations ont été réalisées pour évaluer les performances de nos trois contributions en choisissant les performances de métrique que nous avons jugé importantes.

Les deux premières méthodes ont été évaluées sous le simulateur WSNet. Pour La dernière nous avons utilisé le simulateur Castalia sous la plateforme OMNET++.

5.2 Contributions pour les réseaux de capteurs mobiles

5.2.1 La première contribution

5.2.1.1 Problématique

Le principal objectif des méthodes de contrôle de puissance de transmission est de transmettre d'une manière fiable les paquets avec une consommation d'énergie minimale dans le but de prolonger la durée de vie du réseau. L'efficacité énergétique a un compromis inhérent avec la connectivité. Augmenter la puissance de transmission, induit à une augmentation dans le rayon de transmission, cela mène à une bonne connectivité du réseau. Dans le cas contraire, la diminution de la puissance de transmission peut causer des altérations sur la connectivité du réseau. Pour cela la valeur de la puissance de transmission doit trouver un compromis entre la consommation d'énergie et la connectivité du réseau. Les protocoles de contrôle de puissance pour les réseaux de capteurs sans fil ont été largement étudiés dans la littérature. Cependant, la majorité de ces protocoles ont été conçus pour les réseaux de capteurs statiques.

Il est connu dans la littérature, dans les protocoles de routage proposés pour les réseaux Ad hoc [M. Masdari and M.Tanabi, 2013], qu'avoir des informations sur les voisins à deux sauts peut garantir une bonne connectivité du réseau. En se basant sur cette stratégie, nous avons utilisé des informations sur le voisinage à deux sauts dans notre algorithme comme critère d'adaptation de la puissance de transmission de chaque nœud capteur.

Dans cette section, nous présentons notre première contribution dans l'axe de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs mobiles. Notre algorithme vise à ajuster la puissance

de transmission de chaque nœud capteur mobile pour économiser l'énergie dépensée tout en maintenant une bonne connectivité du réseau.

5.2.1.2 L'algorithme proposé

A. Paramètres de conception fondamentaux

Le but principal de notre contribution est de fournir un algorithme de contrôle de puissance de transmission complètement distribué pour les réseaux de capteurs sans fil. Cet algorithme était conçu pour atteindre les objectifs suivants :

- Minimiser l'énergie consommée par chaque nœud mobile dans la phase de transmission et ainsi prolonger la durée de vie du réseau.
- Atteindre une bonne connectivité du réseau et la maintenir durant la durée de vie du réseau.
- Proposer une méthode de contrôle de puissance qui peut être intégrée dans différents protocoles de routage.

Certaines suppositions sont considérées très importantes pour la conception de cet algorithme et qui sont :

- La distribution aléatoire des nœuds
- Chaque nœud capteur doit connaître son identifiant (**ID**) et sa position GPS. Nous supposons que chaque nœud est équipé par une unité GPS [G. Hackman et al., 2008].
- Tous les nœuds sont mobiles et suivent le modèle de mobilité « billard » [17].
- Initialement, tous les nœuds sont homogènes en termes de capacité énergétique.

B. Description de l'algorithme proposé

Nous proposons un algorithme de contrôle de puissance distribué conçu pour les réseaux de capteurs sans fil mobiles nommé DPCS pour « *Distributed scheme for transmission Power Control in mobile wireless sensor networks* », qui consiste à la variation de la puissance de transmission de chaque nœud mobile en se basant sur les informations topologiques [A. Bendjeddou et al., 2012]. Chaque nœud mobile ajuste sa puissance de transmission en fonction de ses voisins à deux sauts dans le but de minimiser l'énergie consommée et aussi avoir une bonne connectivité.

L'algorithme est constitué de deux phases : *La phase de découverte de voisinage* et *La phase d'ajustement de la puissance de transmission*.

- **La phase de découverte de voisinage**

Cette phase est constituée des étapes suivantes :

1. Au début, tous les nœuds initient leurs découvertes de voisinage en utilisant la même puissance de transmission qui est la puissance maximale.
2. Chaque nœud, périodiquement, transmet un message Hello contenant ces deux informations : son identifiant (id), sa position GPS (pos).
3. Chaque nœud recevant le message hello vérifie sa table de voisinage, si l'identifiant (id) du récepteur n'existe pas dans sa table de voisinage, la distance (d) entre le nœud émetteur et le nœud récepteur sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (5.1)$$

Où (x_1, x_2) et (y_1, y_2) sont respectivement les coordonnées GPS de l'émetteur et du récepteur.

4. Après cela, l'identifiant du nœud émetteur (id) et la distance (d) seront ajoutés à la table de voisinage.
5. Dans le cas où l'identifiant existe déjà dans la table de voisinage, le message Hello va être ignoré.

La figure 5.1 montre l'organigramme de la phase de découverte de voisinage.

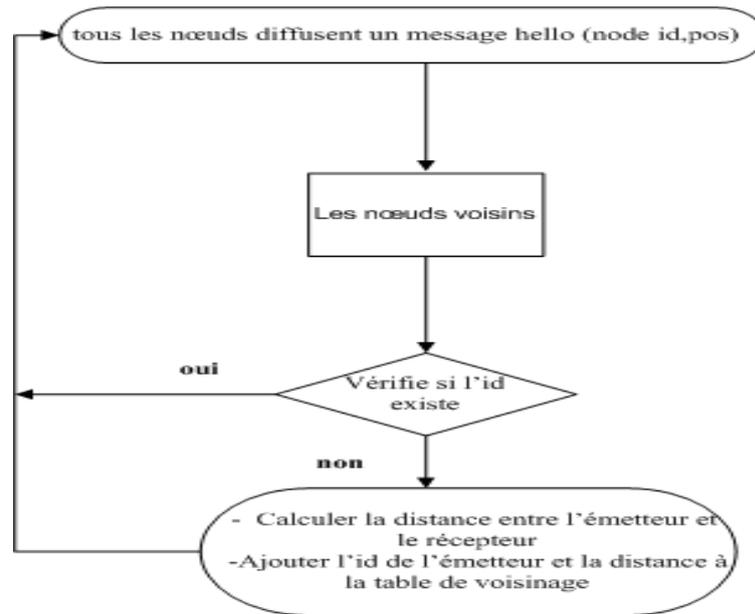


FIG.5.1 – la phase de découverte de voisinage.

- La phase d'ajustement de la puissance de transmission

Dans cette phase les opérations suivantes sont exécutées :

- Le nœud explore sa table de voisinage à la recherche d'un voisin à deux sauts.
- S'il trouve un voisin à deux sauts :
 - Il calculera la distance qui correspond au voisin à deux sauts le plus éloigné
 - Après il ajuste sa puissance de transmission en fonction de cette distance. La puissance de transmission sera ajustée en utilisant les valeurs montrées dans le tableau 5.1.
- Sinon
 - Il laisse la puissance de transmission à la valeur maximale.

La figure 5.2 ci-dessous illustre cette phase

Distance (m)	Puissance de transmission (dbm)
1-34	-30
35-38	-29
39-43	-28
44-48	-27
49-54	-26
55-61	-25
62-69	-24
70-77	-23
78-86	-22
87-97	-21
97-109	-20
110-122	-19
123-126	-18
127-196	-15
197-200	0

TAB.5.1 – Les puissances de transmission en fonction de la distance

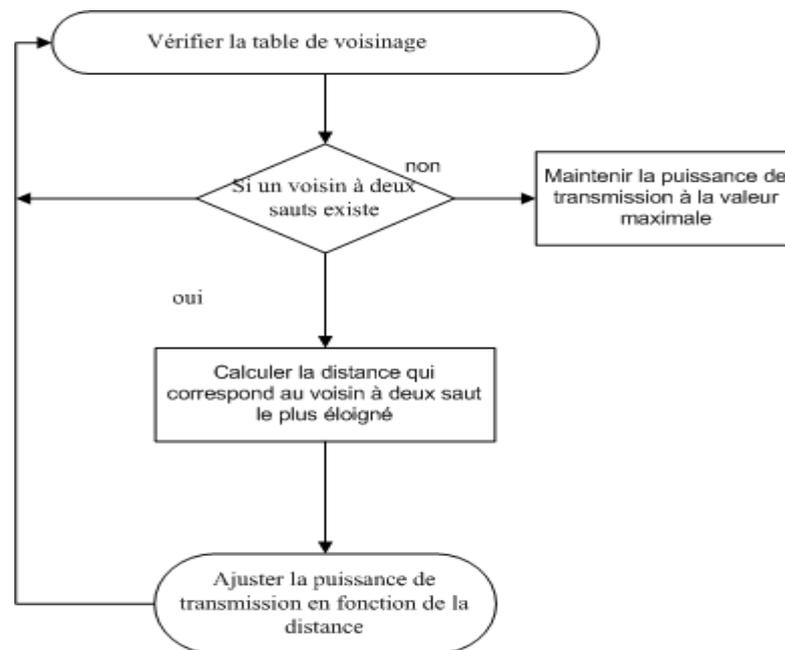


FIG.5.2 – La phase d'ajustement de la puissance de transmission

5.2.1.3 Evaluation des performances

1. Paramètres de simulation

Les simulations menées pour les deux premières contributions de cette thèse ont été réalisées à l'aide du simulateur WSNNet [17]. WSNNet est un simulateur de réseaux de capteurs à événements discrets développé à l'origine au laboratoire CITI de l'INRIA. WSNNet fonctionne sous Linux et il a l'avantage d'être gratuit. Un gros avantage de WSNNet est la facilité avec laquelle on peut programmer un module qui sera ensuite utilisé pour les simulations.

- Nous avons utilisé une topologie constituée, respectivement, de 50, 100, 200, 400, et 600 nœuds.
- Les nœuds sont distribués aléatoirement dans une surface de 100 x 100 mètres.
- Une seule station de base qui est située au centre, est utilisée.
- Les nœuds sont tous mobiles, nous avons utilisé le modèle de mobilité billard. Les nœuds se déplacent aléatoirement en utilisant des vitesses aléatoires qui varient dans l'intervalle [1, 6] m/s.
- Les nœuds utilisent le trafic CBR¹ (Constant Bit Rate) avec un taux d'envoi de 1 paquet chaque 2s.
- Tous les nœuds, initialement, ont le même montant d'énergie qui est 60 dBm.
- Chaque nœud peut émettre des signaux avec une puissance maximale de 0dBm et une puissance minimale de -30dBm.
- Les nœuds utilisent le protocole de routage Greedy [B. Karp and H. T. Hung, 2000] pour l'acheminement des paquets à la station de base.

2. La comparaison

Comme mentionnées dans l'état de l'art, les techniques de contrôle de puissance ont été largement étudiées pour les réseaux de capteurs sans fil statiques. Jeong & Terzis ont proposé dans [JeongGil Ko and A.Terzis, 2010] la première méthode expérimentale pour les réseaux de capteurs mobiles. Cependant, ce travail se base sur la qualité de lien et il ne traite pas l'aspect de connectivité du réseau qui représente une métrique de performance très importante dans les réseaux de capteurs sans fil.

¹ Débit Constant – Catégorie de trafic utilisée pour le transport d'informations numériques comme la vidéo ou la voix, qui peut être représenté par un flux continu de bits. Le trafic CBR nécessite une bande passante et un niveau de service garanti. Aussi appelé service de classe A.

Comme première évaluation de ce travail, nous allons comparer notre méthode à une méthode classique. Dans notre méthode, le nœud ajuste sa puissance de transmission au fil du temps selon ses besoins. Tandis que dans la méthode classique, le nœud garde la même valeur de puissance de transmission (la valeur initiale) tout au long de la durée de vie du réseau.

3. Métriques de performances

Pour l'évaluation des performances de notre méthode, nous avons choisi un ensemble de métriques de performance.

Notre méthode DPCS a été conçue spécialement pour atteindre deux principaux objectifs :

- minimiser l'énergie consommée par chaque nœud mobile et ainsi prolonger la durée de vie du réseau.
- Assurer une bonne connectivité du réseau.

Pour cette raison, nous avons choisi l'énergie consommée en moyenne, le facteur de connectivité et la durée de vie du réseau comme métriques de base.

Nous avons également choisi d'autres métriques de performance tels que : le retard moyen de bout-en-bout et les interférences des nœuds pour analyser d'avantage les performances de notre méthode.

Le choix de ces métriques est soutenu par les points suivants :

- Tout d'abord, les capteurs sont alimentés par une batterie limitée en énergie. Si un nœud épuise son énergie, il sera considéré comme mort, car il ne peut pas assurer ses fonctionnalités dans le réseau. Ainsi, la mort d'un ou plusieurs nœuds peut provoquer une interruption partielle ou complète de la communication dans le réseau. Dans ce cas là, le réseau sera mort.
- Deuxièmement, la connectivité est très importante dans les réseaux de capteurs sans fil. Une bonne connectivité est assurée à un nœud source d'atteindre tous les autres capteurs du réseau via un ou plusieurs sauts. La connectivité est souvent associée au nombre de voisins d'un nœud [O. K. Tonguz and G. Ferrari, 2006]. Si le nœud perd tous ou une partie de ses voisins, il pourra y avoir un impact sur la communication dans le réseau. Ainsi, une partie de l'information sera perdue.
- Troisièmement, les techniques de contrôle de puissance de transmission ne permettent pas seulement de réduire la consommation d'énergie, mais aussi permettent de réduire les

interférences dans le réseau. Quand on a un grand taux d'interférence, beaucoup de collisions seront générées et ainsi le retard de bout-en-bout dans le réseau peut être très important. Par ailleurs, réduire les interférences dans le réseau permet de réduire la retransmission des paquets qui a un impact considérable sur la consommation d'énergie.

Le calcul de ces métriques se fait comme suit :

- ***Energie consommée***

Nous nous sommes intéressés à l'énergie consommée en transmission E_{Tx} et en réception E_{Rx} , qui peuvent être calculées à l'aide des deux formules suivantes [F. Djemili et al., 2007] :

$$E_{Tx} = t * P_{Tx} \quad (5.2)$$

$$E_{Rx} = t * P_{Rx} \quad (5.3)$$

Où:

t: temps nécessaire pour la transmission.

P_{Tx} : la puissance de transmission.

P_{Rx} : la puissance de réception.

- ***Facteur de connectivité***

Le facteur de connectivité F_c est utilisé pour évaluer la connectivité du réseau. Il se calcule comme suit [F. Djemili et al., 2007]:

$$F_c = \frac{1}{\text{nombre de composante connexe}} \quad (5.4)$$

- ***Durée de vie du réseau***

La durée de vie du réseau est définie comme étant le temps écoulé entre l'instant où le réseau commence son fonctionnement et l'instant où il n'est plus connecté (à cause de la défaillance d'un ou de plusieurs capteurs).

- ***Interférence du nœud***

Nous avons utilisé le modèle d'interférence proposé dans [X.M. Zhang et al., 2009]. Ce modèle a été implémenté pour mesurer l'interférence de chaque nœud.

Dans ce modèle, la valeur totale de l'interférence du nœud «b» est calculée par l'équation suivante :

$$I(b) = \sum_{a \in S_b} \frac{T_a}{d_{ba}^k} + \sum_{c \in (S_{2R} - S_b)} \left(\frac{2}{3}\right)^k \frac{T_c}{R^k} \quad (5.5)$$

Où :

S_b : l'ensemble de tous les voisins situés dans le rayon de communication.

S_{2R} : l'ensemble des voisins à deux sauts.

T_a et T_c : le taux de livraison des paquets du nœud.

d_{ba} : la distance entre le nœud b et le nœud a.

R: le rayon de transmission du nœud.

K : c'est l'index, $K \in [2, 4]$.

Notez que dans notre méthode nous n'utilisons pas les données historiques pour calculer l'interférence du nœud.

- *Le retard moyen*

Le retard moyen est défini comme la moyenne du temps écoulé entre l'envoi du paquet et la réception de ce paquet à la station de base.

4. Résultats numériques et discussions

- **Energie moyenne consommée en fonction du temps et de la densité du réseau**

Pour mesurer l'impact de la variation de la puissance de transmission sur l'énergie consommée, nous avons mesuré l'énergie consommée en fonction du temps de simulation. Par ailleurs, nous avons varié la densité du réseau, pour chaque scénario nous avons utilisé 50, 100, 200, 400 et 600 nœuds respectivement.

Figure 5.3.a, montre la moyenne de l'énergie consommée par rapport au temps de simulation pour 50 capteurs et la figure 5.3.b, présente l'énergie consommée en moyenne sous différentes densités du réseau.

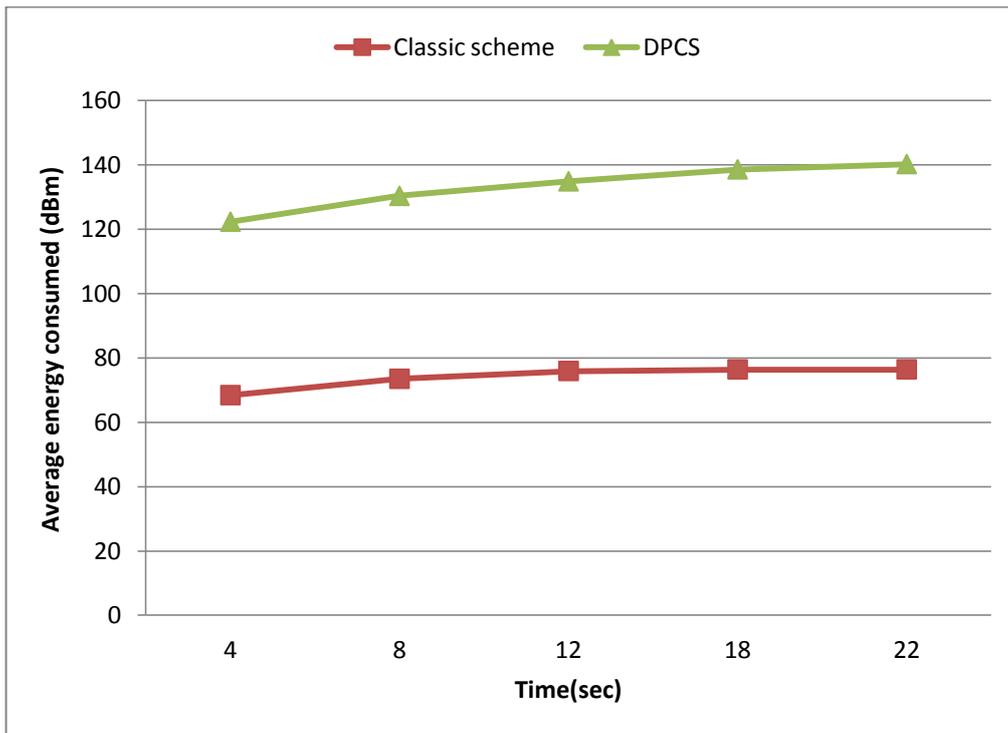


FIG.5.3.a – L'énergie moyenne consommée en fonction du temps

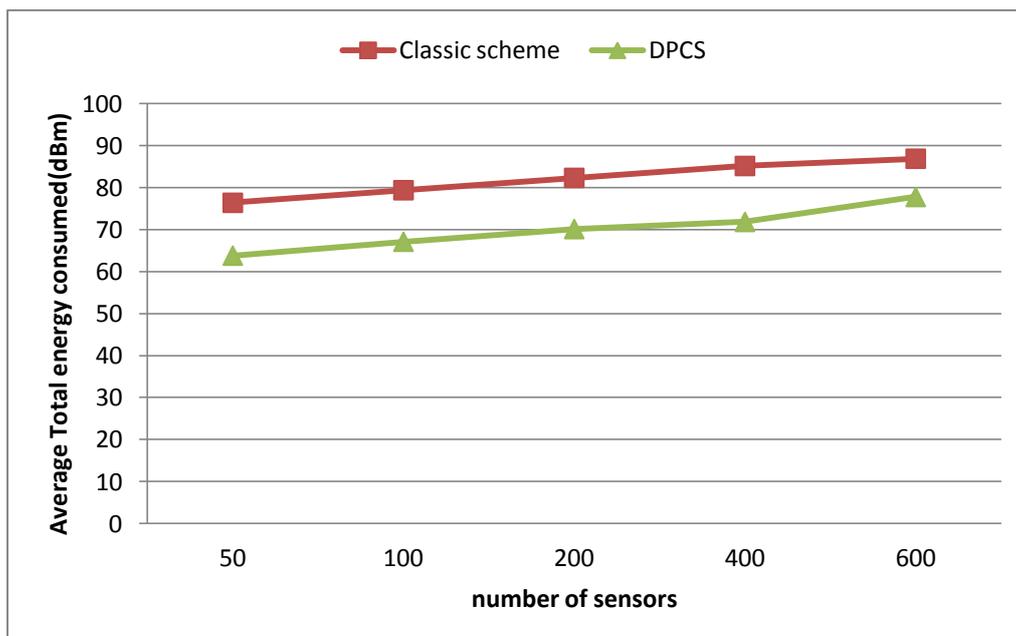


FIG.5.3.b – La consommation d'énergie moyenne par rapport au nombre de nœuds

Discussion

Dans la figure 5.3.a, nous observons qu'à chaque instant t , DPCS consomme moins d'énergie que la méthode classique. Lorsque les nœuds mobiles ont un nombre suffisant de voisins (voisins à deux sauts), ils ajustent leurs puissances d'émission en fonction du voisin à deux sauts le plus éloigné. Ainsi, la puissance de transmission est diminuée. Dans ce cas, moins d'énergie, en moyenne, est consommée au fil du temps comparant à la méthode classique.

Dans la figure 5.3.b, nous remarquons que l'énergie moyenne consommée augmente avec l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau. Cela est dû au fait que lorsque le nœud a un grand nombre de voisins, il demande plus d'énergie pour la communication. Nous constatons également que la méthode DPCS améliore la méthode classique en termes de consommation d'énergie, ce qui signifie que l'adaptation de la puissance de transmission pour chaque nœud mobile permet de diminuer d'une manière significative l'énergie dépensée dans le réseau.

- **Le facteur de connectivité**

Nous avons choisi pour cette expérience 100 capteurs. La figure 5.4 montre le facteur de connectivité de la méthode classique et la méthode DPCS au fil du temps.

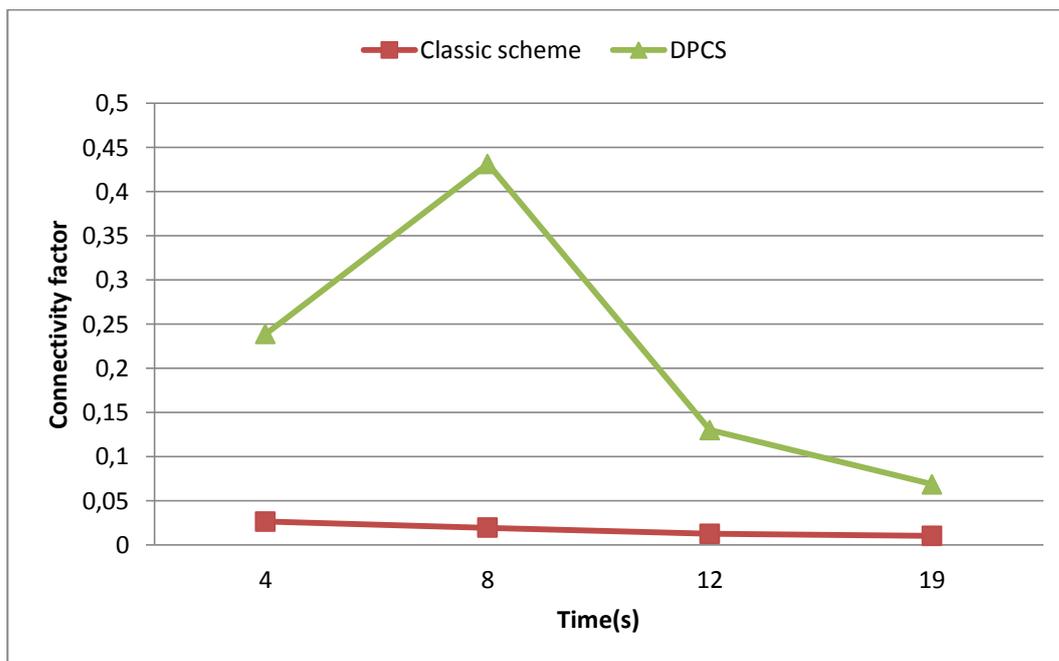


FIG.5.4 – Le facteur de connectivité au fil du temps

Discussion

Nous observons que le facteur de connectivité dans les deux cas (DPCS et méthode classique) est perturbé. Cela est dû à la mobilité des nœuds capteurs. En fait, les nœuds se déplacent continuellement, quand ils deviennent proches les uns des autres, ils peuvent avoir un grand nombre de voisins, dans ce cas, la connectivité de chaque nœud sera meilleure. Dans le cas contraire, la connectivité se dégrade.

Figure 5.4 montre qu'à chaque instant t et malgré la mobilité des capteurs notre méthode DPCS atteint un meilleur facteur de connectivité comparée à la méthode classique. Cette amélioration de la connectivité du réseau est expliquée par l'ajustement de la puissance de transmission en fonction du nombre de voisins à deux sauts. Dans ce sens, dans la méthode DPCS chaque nœud garde un nombre suffisant de voisins qui lui permettra d'avoir une bonne connectivité. En fait, notre méthode DPCS vise à économiser l'énergie consommée sans pénaliser la connectivité du réseau.

- **La durée de vie du réseau**

Pour évaluer l'impact de la variation de la puissance d'émission sur la durée de vie du réseau pour notre méthode et la méthode classique nous avons considéré, respectivement, les densités du réseau suivantes : 50, 100, 200, 400 et 600 nœuds. La figure 5.5 montre les résultats obtenus.

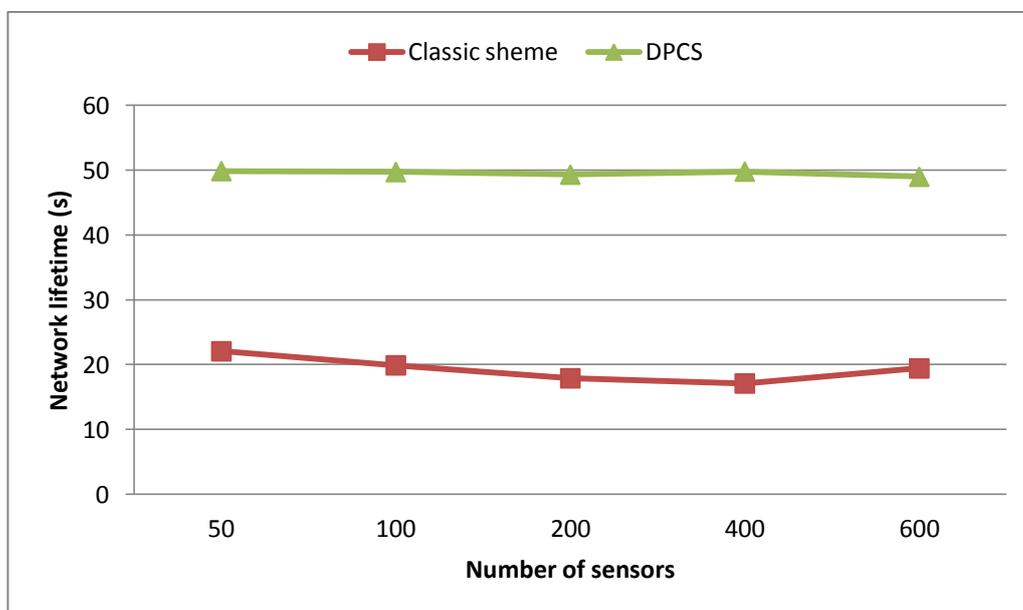


FIG.5.5 – la durée de vie du réseau

Discussion

Dans la figure 5.5 nous constatons que pour toutes les configurations la méthode DPCS apporte une durée de vie du réseau supérieure à la méthode classique. Ceci s'explique par le fait que, lorsque le nœud capteur diminue sa puissance d'émission il peut économiser une quantité de son énergie, comme le montre les deux figures 5.3.a et 5.3.b, ce qui lui permettra par la suite de poursuivre son activité dans le réseau contrairement à la méthode classique.

- **Le taux d'interférences**

La figure 5.6 compare les performances de la méthode DPCS et la méthode classique en termes de taux d'interférences.

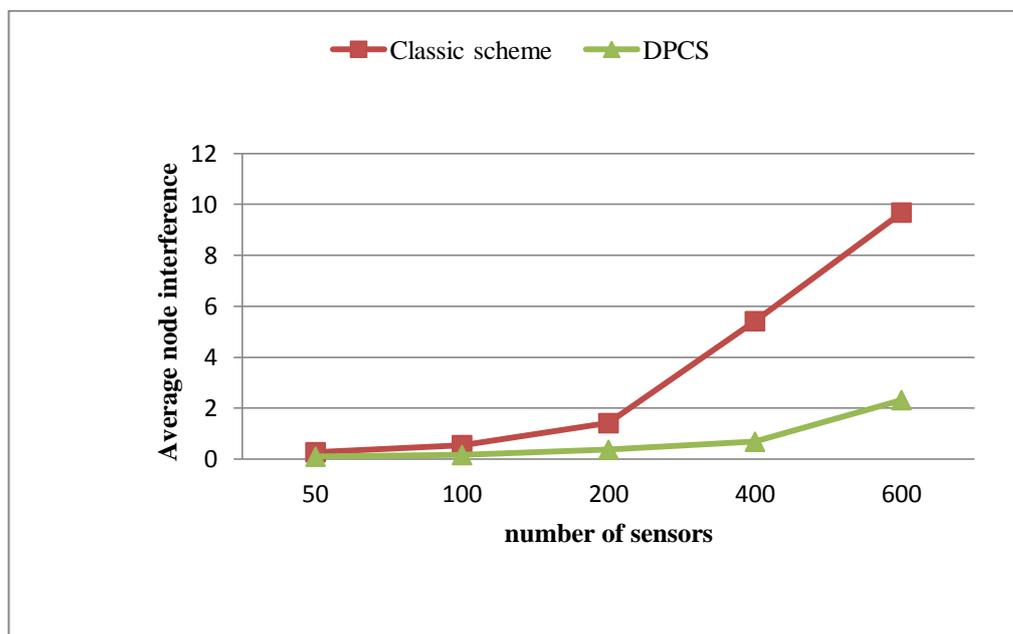


FIG.5.6 – Le taux d'interférences moyen par rapport au nombre de nœuds dans le réseau

Discussion

Dans la figure 5.6, nous observons que pour les deux méthodes DPCS et classique, le taux d'interférences augmente avec l'augmentation de la densité du réseau. Ceci s'explique par le fait que lorsque le nombre de nœuds augmente dans le réseau, la charge du trafic augmente également. Cela va générer plus d'interférences.

Nous constatons de la figure 5.6 que le taux d'interférences moyen généré par notre méthode DPCS est inférieur à celui produit par la méthode classique. En fait, quand on diminue la puissance d'émission, le nombre de voisins diminue aussi. Alors, moins de trafic sera généré.

- **Le retard moyen**

La figure 5.7 montre le retard moyen pour l'arrivée d'un paquet à la station de base de la méthode DPCS et la méthode classique sous différentes densités du réseau.

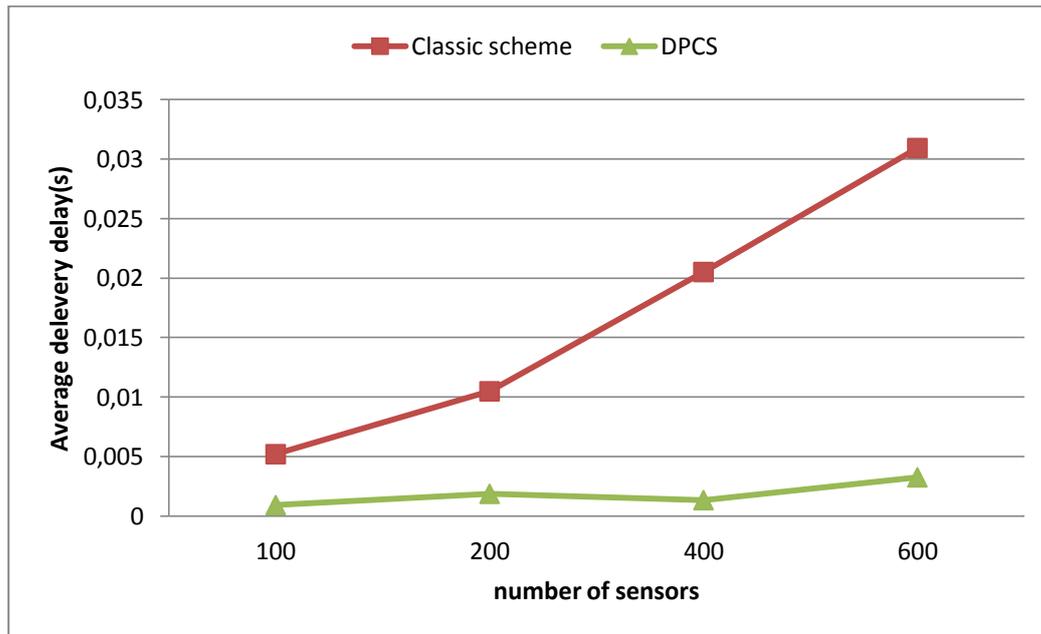


FIG.5.7 – Le retard moyen produit par les deux méthodes DPCS et la méthode classique.

Discussion

Comme montré dans la figure ci-dessus, le retard moyen généré par la méthode classique augmente d'une manière significative avec l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau contrairement à la méthode DPCS. Ceci s'explique par le taux important d'interférences produit par la méthode classique, comme le montre la figure 5.6.

Nous observons également que le retard de bout en bout généré par la méthode DPCS est nettement inférieur que celui de la méthode classique. Dans notre méthode le nœud diminue sa puissance de transmission quand il a suffisamment de voisins. Dans ce cas la, le taux d'interférence du nœud sera réduit comme représenté sur la figure 5.4. La diminution des interférences induit une diminution des collisions. Ainsi, le retard moyen sera réduit.

5.2.2. La deuxième contribution

Après avoir présenté notre première contribution, nous présentons dans cette section la deuxième contribution de cette thèse qui continue dans le même axe de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil mobiles.

La deuxième contribution consiste à proposer une stratégie pour le contrôle de l'état de la radio pour économiser d'avantage la consommation d'énergie et aussi minimisez le retard moyen de bout en bout.

Elle a été conçue pour les réseaux de capteurs mobiles destinés pour la surveillance, plus précisément nous avons conçu cette stratégie pour le réseau Zebranet [P. Juang et al., 2002]. L'idée est de permettre aux nœuds de réserver une partie de leurs énergies pour relier les données des autres nœuds.

Les réseaux de capteurs destinés pour la surveillance supportent généralement des applications orientées événement. Dans ce type d'application le nombre d'occurrence de l'échantillonnage des données (la détection) est lié au nombre d'occurrence d'apparition de l'événement désiré sur un intervalle de temps bien défini . Généralement les événements à détecter occurrent aléatoirement dans l'espace et dans le temps. Pour cette raison nous avons introduit la théorie des probabilités dans notre deuxième contribution.

Nous avons proposé deux méthodes probabilistes qui ont pour objectif commun la minimisation de l'énergie consommée et aussi la minimisation du retard moyen de bout en bout.

L'idée de base de ces deux méthodes est comme suit : si le restant de la batterie d'un nœud devient inférieur à un seuil pré-calculé, le nœud passe du mode détection au mode relais.

Les deux méthodes se diffèrent dans leurs manières de définir le seuil. La première méthode utilise un seuil fixe pour tous les nœuds du réseau, tandis que la deuxième utilise pour chaque nœud un seuil différent. Avant de détailler les deux méthodes proposées, nous allons donner un aperçu sur le réseau Zebranet.

5.2.2.1 Aperçu sur Zebranet

Le système Zebranet [P. Juang et al., 2002] est un réseau de capteurs sans fil mobile conçu pour la surveillance des zèbres. Le système Zebranet est composé d'un ensemble de colliers

de suivi personnalisé (les nœuds du réseau) porté par les animaux pour l'étude de leurs comportements. Chaque collier représente un petit capteur contenant une mémoire flash, un petit processeur (CPU), un système de localisation (GPS) et un transducteur sans fil. Ces colliers fonctionnent comme un réseau *peer-to-peer* pour délivrer les données enregistrées aux observateurs (chercheurs).

Zebranet est conçu sous un ensemble de contraintes parmi celles-ci nous citons dans ce qui suit celles qui nous ont inspiré pour notre travail :

1. Le premier objectif est d'assurer une bonne communication des positions GPS aux chercheurs.
2. La collecte des positions GPS se fait chaque trois minutes.
3. Le nœud doit rester opérationnel durant la période d'une année.
4. Le poids des colliers portés par les zèbres est limité entre 3 et 5 lbs (bound) qui vaut 1.36 et 2.27 Kg, respectivement. Les petits zèbres peuvent nécessiter des colliers plus légers.
5. Tous les nœuds, sauf la station de base, sont des nœuds sources qui ont pour rôle la collecte des positions GPS périodiquement.
6. La mobilité des zèbres peut varier selon trois états : mobilité faible quand le zèbre se nourrit, mobilité moyenne quand il est à la recherche de la nourriture, forte mobilité dans la présence d'un prédateur.
7. La communication utilisée est à un seul saut quand la station de base est dans le rayon de transmission du nœud, sinon c'est une communication multi-saut.

5.2.2.2 Contraintes de conceptions fondamentales

En se basant sur les contraintes liées au système Zebranet nous avons proposé deux méthodes probabilistes. Le but principal de ces deux méthodes est :

1. Minimiser l'énergie consommée par chaque nœud mobile.
2. Minimiser le retard de bout en bout.

Dans la première méthode nous utilisons un seuil fixe pour tous les nœuds du réseau. Cette méthode suppose que les nœuds du réseau ont tous la même capacité en termes d'énergie initiale et aussi la vitesse. Ce qui n'est pas vraiment similaire aux vraies contraintes de Zebranet.

La deuxième méthode traite ces deux lacunes de la première méthode, en calculant pour chaque nœud son propre seuil en tenant compte de la vitesse et aussi de l'énergie initiale du nœud [A.Bendjeddou, N.Ghoualmi.,2012]. En fait, il y'a des facteurs considérés comme fondamentaux pour la conception de ces deux méthodes et qui sont :

1. Tous les nœuds du réseau sont mobiles.
2. Le nœud peut avoir trois modes : relais, détection et sommeil.
 - Dans le mode détection : le nœud collecte les positions GPS et les transmet par la suite à la station de base.
 - Le mode relais : le nœud ne fait que relier les données de ses nœuds voisins
 - Le mode sommeil : la radio est mise hors tension.
3. Tous les nœuds sont synchronisés à se réveiller en même temps.
4. Les nœuds sont distribués aléatoirement.

5.2.2.3 La méthode probabiliste avec le seuil fixe PMFT (*Probabilistic methods with Fixed threshold*)

Cette méthode utilise un seuil fixe pour tous les nœuds du réseau, ce seuil demeure statique au fil du temps. Dans cette méthode, tous les nœuds vérifient périodiquement leurs batteries, si le taux de la batterie est inférieur au seuil fixe, le nœud passe du mode détection au mode relais. Dans le cas contraire le nœud reste en mode de détection. En outre, lorsque le nœud a des données à transmettre, il choisit parmi ses voisins, le nœud voisin qui a ces deux propriétés :

1. Le nœud ayant l'énergie résiduelle maximale.
2. Le nœud ayant le minimum d'interférence.

La méthode probabiliste avec le seuil fixe PMFT se compose de deux phases : *la phase de changement d'état du nœud* et *la phase du choix du nœud relais* qui seront décrites en détails par la suite. Mais avant nous montrons comment est calculé le seuil.

a) Calcul du seuil fixe

Le seuil représente le taux d'énergie restant qui permet au nœud capteur de continuer son activité dans le réseau.

Dans les applications de surveillance, les évènements se produisent indépendamment les uns des autres de façon aléatoire et imprévisible (dans le temps). Dans ce genre de situation, on dit que les événements suivent un processus poissonnier [Catherine Forbes et al., 2010] .

Comme notre méthode est destinée pour Zebranet, nous modélisons le mouvement des zèbres comme un événement. Nous montrons dans la figure 5.8 la distribution du mouvement des zèbres observée par les biologistes.

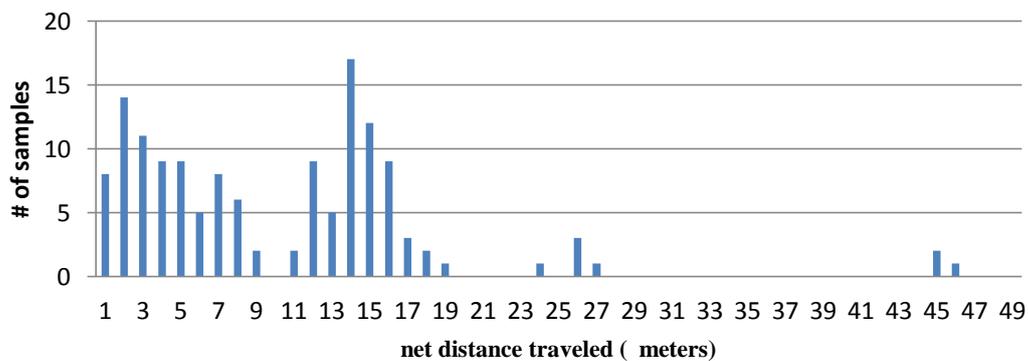


FIG.5.8 – le mouvement des zèbres [P. Juang et al., 2002].

Comme le montre la figure ci-dessus, les zèbres bougent d'une manière imprévisible au fil du temps, dans ce cas on dit que le mouvement des zèbres suit un processus de Poisson. Pour cette raison nous utilisons la loi de poisson pour le calcul du seuil.

- **Loi de poisson**

On appelle processus poissonnier [D. Mouchiroud, 2002] (ou processus de Poisson), le modèle probabiliste des situations qui voient un flux d'évènements se produire les uns à la suite des autres de façon aléatoire (dans le temps et dans l'espace), obéissant aux conditions suivantes :

- *la probabilité de réalisation de l'évènement au cours d'une petite période ou sur une petite portion d'espace Δt est proportionnelle à Δt soit $p\Delta t$.*
- *Elle est indépendante de ce qui s'est produit antérieurement ou à côté.*
- *la probabilité de deux apparitions sur le même Δt est négligeable.*

Ainsi, des évènements qui se réalisent de façon aléatoire comme des pannes de machines, des accidents d'avions, des fautes dans un texte, ...peuvent être considérés comme relevant d'un processus poissonnien

Une variable aléatoire X à valeurs dans R suit une loi de Poisson de paramètre λ ($\lambda > 0$)

si les réels $P(k=X)$ sont donnés par :

$$P(X = K) = \frac{\lambda^K e^{-\lambda}}{K!} \quad (5.6)$$

On note $X \rightarrow P(\lambda)$ ou

λ : nombre moyen d'occurrences d'événement dans un intervalle de temps .

- *e est la base de l'exponentielle (2,718...)*

• **La formule utilisée pour le calcul du seuil**

En se basant sur l'analyse faite en haut, le seuil sera calculé comme suit :

$$threshold = E_{Tot} \times \alpha \quad (5.7)$$

Où :

E_{Tot} est l'énergie totale consommée. Cette dernière est calculée comme suit :

$$E_{Tot} = E_{tx} + E_{rx} \quad (5.8)$$

$$E_{Tx} = T \times P_{Tx} \quad (5.9)$$

$$E_{rx} = T \times P_{rx} \quad (5.10)$$

Où :

E_{Tx} : l'énergie consommée en transmission.

E_{Rx} : l'énergie consommée en réception.

α : c'est probabilités d'avoir K évènements pendant une unité de temps. (K est un entier positive, $K=0, 1, 2, \dots$). α est calculée comme suit:

$$\alpha = \frac{\lambda^K e^{-\lambda}}{K!} \quad (5.11)$$

Où :

e : est le logarithme ($e= 2.71828\dots$).

$K!$: Factoriel de K .

b) La description de la méthode proposée

Nous présentons ici les étapes de la méthode probabiliste avec le seuil fixe. Cette méthode est constituée de deux phases : *la phase de changement d'état* et *la phase du choix du nœud relais*.

- La phase de changement d'état

Dans cette phase, chaque nœud change son état selon le seuil fixe pré-calculé.

- 1) Tout d'abord, tous les nœuds sont synchronisés à se réveiller/dormir en même temps. Et le seuil est calculé au premier déploiement des nœuds de capteurs dans le réseau.
- 2) Dans la période du réveil, chaque nœud vérifie le restant de sa batterie.
 - Si le restant de la batterie est inférieur au seuil fixe pré- calculé
 - Le nœud change son état du mode détection au mode relais.
 - Sinon il reste en mode détection.
- 3) Les étapes ci-dessus (1 et 2) sont répétées tout au long de la durée de vie du réseau.

- La phase du choix du relais

Dans cette phase, le nœud de capteur qui a des données en attente, choisit le nœud relais en fonction de deux paramètres : l'énergie restante et le taux d'interférences du nœud relais. Il choisira le nœud relais ayant le plus d'énergie restante et le minimum d'interférences.

Notre choix de ces mesures est soutenu par les points suivants :

1. Tout d'abord, les capteurs sont pris en charge par une quantité limitée d'énergie. Si un nœud épuise son énergie, il sera considéré comme mort parce qu'il ne peut pas réaliser ses tâches dans le réseau. Par ailleurs, cela peut causer une interruption partielle ou totale de la communication du réseau. En outre la sélection périodique du nœud relais peut équilibrer la consommation d'énergie dans le réseau.

2. Deuxièmement, si la topologie a un taux élevé d'interférences, beaucoup de collision seront produites, ce qui engendre à son tour un retard de bout en bout très important. Ainsi, la réduction des interférences minimise la retransmission des paquets qui affecte la consommation d'énergie et par la suite la durée de vie du réseau.

Cette phase est composée des étapes décrites comme suit :

- 1) Le taux d'interférences de chaque nœud ainsi que l'énergie restante sont calculés périodiquement.
- 2) Lorsque le nœud a des données à transmettre, il choisit parmi ses voisins, le nœud relais qui a le plus d'énergie restante et le minimum d'interférences.
- 3) Après cela, il va envoyer ses données au nœud relais avec énergie restante maximum et minimum d'interférences.

Les interférences sont calculées en utilisant la formule (5.5) décrite au début de ce chapitre.

c) Evaluation des performances de la méthode avec seuil fixe PMFT

1. la comparaison

Afin d'évaluer les performances de la méthode probabiliste avec le seuil fixe PMFT, nous avons utilisé le simulateur WSNNet [17] décrit plus haut. Le but principal de notre méthode est de minimiser la consommation d'énergie et aussi minimiser le retard moyen de bout-en-bout.

Pour cette raison, la méthode était comparée en termes de consommation d'énergie. En outre, pour examiner les performances de notre méthode en termes de retard de bout-en-bout, nous l'avons comparé au protocole de routage Greedy [B. Karp and H. T. Hung, 2000].

- Régime sommeil/réveil synchrone

Il utilise un sommeil / réveil synchrone où tous les nœuds dorment et se réveillent en même temps.

- Protocole Greedy

Dans le protocole Greedy, le nœud qui a des données à envoyer, transmet le paquet de données au voisin le plus proche de la station de base.

2. Modèle et paramètres de simulation

Comme il a été mentionné plus haut, notre méthode est conçue pour les réseaux de capteurs sans fil mobiles destinés pour la surveillance, plus précisément ZebraNet. Pour cette raison, dans les différents scénarios de simulation, nous utilisons la même configuration utilisée pour ZebraNet. Le seuil est calculé en utilisant les données spécifiées dans [Ilyas et al., 2007].

- Nous avons utilisé une topologie comportant : 20, 40, 60, 80 et 100 nœuds respectivement.
- Les nœuds sont distribués d'une manière aléatoire dans une zone de 200 x200 mètres.
- Une seule station de base est utilisée, elle se situe au centre.
- Les nœuds bougent aléatoirement avec des vitesses aléatoires qui varient entre 0 et 18 m/s.
- Tous les nœuds au début ont la même énergie résiduelle qui est 60 dBm.
- Tous les nœuds du réseau sauf la station de base ont la capacité de collecter et de relier les données périodiquement.

3. L'évaluation

Pour réaliser une étude comparative nous avons choisi l'analyse des deux métriques suivantes :

- *Energie consommée*

Nous nous intéressons à l'énergie consommée en transmission et en réception. Pour cela, nous utilisons les deux formules (5.9) et (5.10). Nous avons mesuré l'énergie consommée en fonction du temps et en fonction de la densité du réseau.

- *Le retard moyen de bout-en-bout*

Le retard moyen de bout-en-bout est le délai moyen écoulé entre l'envoi du paquet par le nœud source et la réception de ce paquet par la station de base. Il se calcule comme suit :

$$\text{Average delay} = T_{rec} - T_{trans} \quad (5.12)$$

Où :

T_{rec} : est le temps de réception du paquet par la station de base.

T_{trans} : est le temps de transmission du même paquet.

4. Résultats numériques et discussions

Nous comparons les performances de notre méthode au régime sommeil/réveil en termes de consommation moyenne d'énergie et au retard moyen et au protocole Greedy en termes de retard moyen de bout-en-bout. Les résultats de simulations numériques sont montrés et discutés dans ce qui suit.

- **La consommation moyenne d'énergie en fonction du temps et de la densité du réseau**

La figure 5.9.a, montre l'énergie moyenne consommée au cours du temps pour 20 capteurs et la figure 5.9.b illustre l'énergie consommée par rapport aux nombres de nœuds dans le réseau.

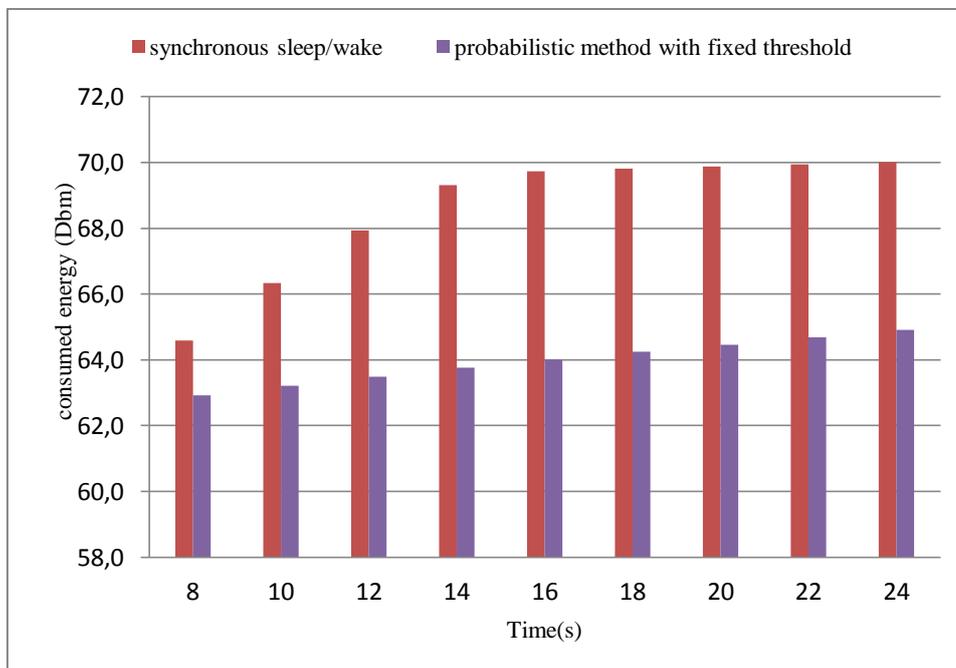


FIG.5.9.a – l'énergie moyenne consommée au fil du temps

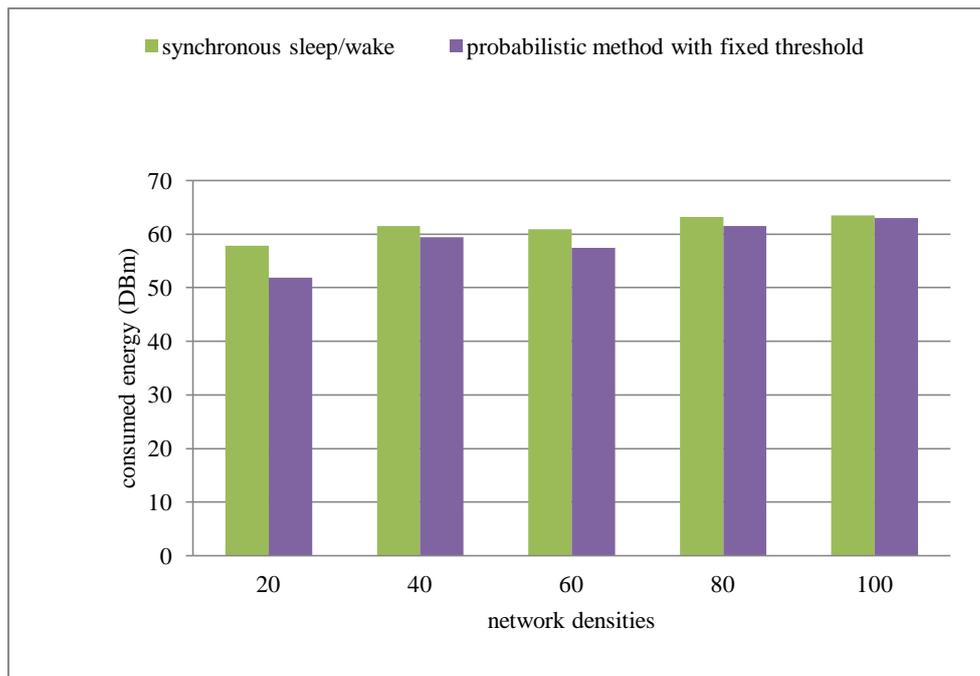


FIG.5.9.b – l'énergie moyenne consommée avec différentes densités du réseau

Discussion

Comme le montre la Figure 5.9.a, l'énergie consommée en moyenne par la méthode PMFT au fil du temps est inférieure à celle consommée par le régime sommeil/réveil synchrone. Cela s'explique par le fait que, lorsque le nœud en mode détection atteint le seuil fixe pré-calculé, il change son état de détection au mode relais. Ainsi, le nœud consomme de l'énergie seulement pour relayer les données de ses voisins. De cette façon, il peut économiser une partie de son énergie.

La figure 5.9.b montre également, que notre méthode améliore le régime sommeil/réveil synchrone en termes de consommation d'énergie même en variant la densité du réseau. Cela signifie que lorsque le nœud change son mode, de détection à relais, il peut diminuer l'énergie consommée. Aussi, la mise en place de l'énergie résiduelle comme critères de sélection du nœud relais joue un rôle important dans la préservation de l'énergie.

Périodiquement, lorsque le nœud a des données à transmettre, il choisira le nœud relais possédant l'énergie résiduelle maximale, cette sélection périodique diminue le gaspillage d'énergie et en même temps équilibre la consommation d'énergie dans l'ensemble du réseau.

- **Le retard moyen sous différentes densités du réseau**

La figure 5.10.a, montre le retard moyen de notre méthode PMFT et le régime sommeil/réveil synchrone. Tandis que la figure 5.10.b montre le retard moyen de PMFT comparé au protocole de routage Greedy.

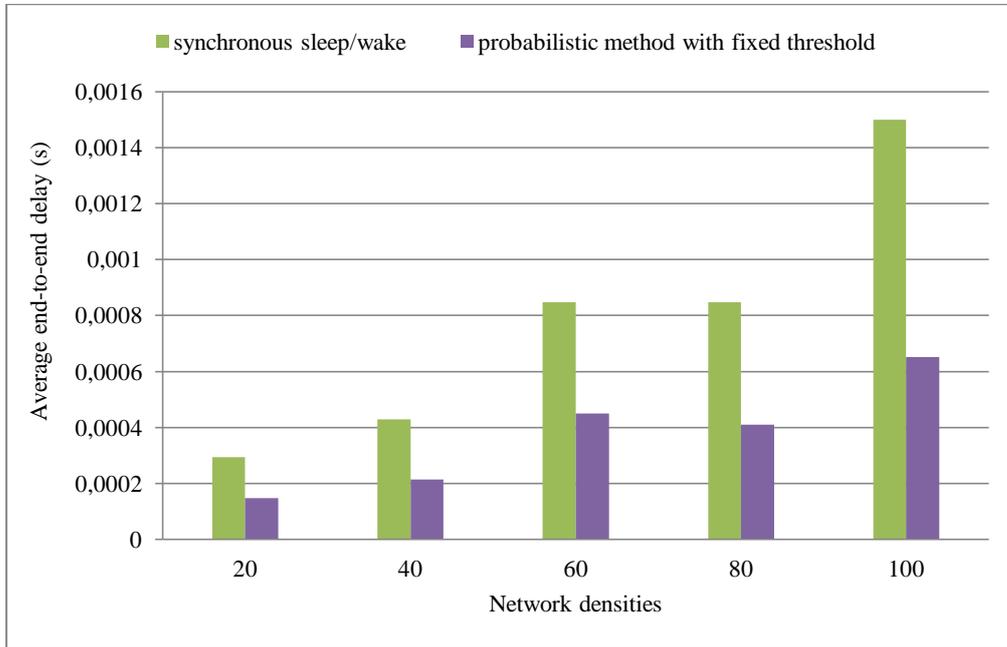


FIG.5.10.a – Le retard moyen de PMFT et le régime sommeil/réveil synchrone

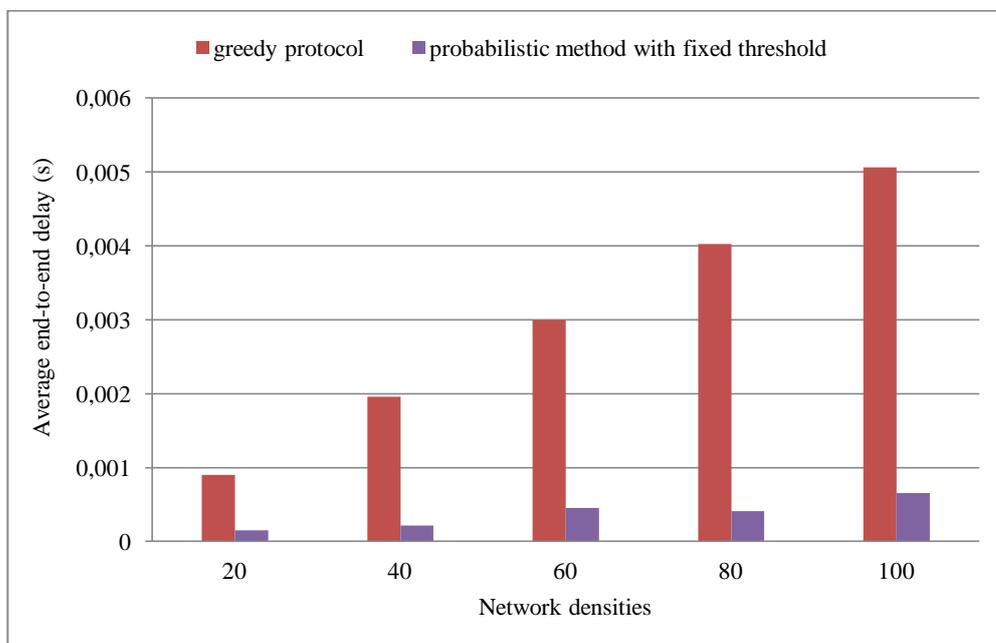


FIG.5.10.b – Le retard moyen de PMFT et le protocole Greedy

Discussion

Nous observons dans la figure 5.10.a que dans le régime sommeil / réveil synchrone le retard moyen généré augmente d'une manière significative avec l'augmentation du nombre de capteurs dans le réseau contrairement à notre méthode. Ceci s'explique par, quand le nombre de nœuds augmente, la charge du trafic dans le réseau augmente aussi. Ainsi, un taux important d'interférences sera généré, provoquant plus de collisions, c'est pourquoi le retard de bout-en-bout augmente.

Nous remarquons également que PMFT réduit la latence de bout-en-bout. Ceci s'explique par que PMFT introduit les interférences comme critères de sélection du nœud relais. Donc, moins de collisions peuvent arriver. Dans ce cas le délai de bout en bout sera amélioré.

Nous observons dans la figure 5.10.b, lorsque la densité du réseau augmente la moyenne du retard de bout-en-bout généré par le protocole Greedy augmente d'une manière importante comparant à PMFT. Dans le protocole Greedy le nœud choisit comme relais le nœud le plus proche de la station de base. Ainsi, un taux important d'interférences sera généré au niveau du récepteur. Pour cette raison, une importante latence est causée. Tandis que dans notre méthode le nœud qui a des données à transmettre, choisit le nœud relais qui a un minimum d'interférences. Ceci permet une réduction significative des collisions ce qui induit à une réduction du retard de bout-en-bout.

5.2.2.4 Une méthode probabiliste avec un seuil variant PMVT (*Probabilistic method with varying threshold*)

a) Problématique

Dans les applications de surveillance des espèces biologiques, en particulier le suivi de faune sauvage, le mouvement de l'animal change fréquemment et par hasard en fonction des événements qui se produisent. Par exemple, les animaux peuvent changer leurs vitesses dans la présence de prédateurs ou pour la recherche de nourriture. Ainsi, lorsque la vitesse des nœuds augmente, l'échantillonnage des données augmente aussi. Donc, le nœud consomme plus d'énergie pour la collecte et la transmission des données.

En revanche, les colliers portés par les animaux représentent des capteurs qui se diffèrent dans la capacité d'un animal à un autre. Par exemple, les animaux de petite taille peuvent nécessiter des capteurs plus légers en termes de poids. Les capteurs les plus légers sont

alimentés par de petites piles, ainsi l'énergie résiduelle du collier sera plus petite. Dans la conception de la méthode probabiliste avec un seuil variant nous prenons ces deux facteurs en considération afin de minimiser la consommation d'énergie par chaque nœud mobile.

Cette méthode est également proposée pour Zebranet, mais à la différence de la première méthode elle définit pour chaque nœud son propre seuil. Dans cette méthode, nous tenons compte des autres caractéristiques (4) et (6) du système Zebranet qui ne sont pas traitées par la première méthode.

La conception de la méthode tient compte de deux paramètres essentiels :

1. Le changement de vitesse des zèbres.
2. L'énergie résiduelle des nœuds capteurs.

Pour pouvoir réaliser cette méthode nous devons comprendre le mouvement des zèbres. Pour cette raison nous allons faire une analyse des études faites par les biologistes concernant le déplacement des zèbres. Nous nous inspirons par la suite du modèle biologiste pour concevoir notre méthode.

b) Le modèle biologiste

Les biologistes [P. Juang et al., 2002] montrent que le mouvement des zèbres peut être décrit par trois états principaux: pâturage (*grazing*), pâturer en marchant (*graze walking*), et mouvement rapide (*fast moving*) comme illustré dans la figure 5.11.

Les Zèbres passent la plupart de leurs temps, jour et nuit, dans l'état de pâturage. Quand les zèbres sont en état de pâturage leur mouvement est faible. À d'autres moments, les zèbres sont dans l'état pâturer en marchant, dans cet état les zèbres se déplacent aléatoirement et ils sont plus rapides qu'auparavant. Dans l'état pâturé en marchant le mouvement des zèbres est caractérisé par une vitesse plus élevée que l'état du pâturage.

Parfois, les zèbres se déplacent plus rapidement, parcourant de longues distances, soit en raison de la présence de prédateurs ou en raison d'épuisement de la zone de végétation. Ce mouvement est appelé état du mouvement rapide.

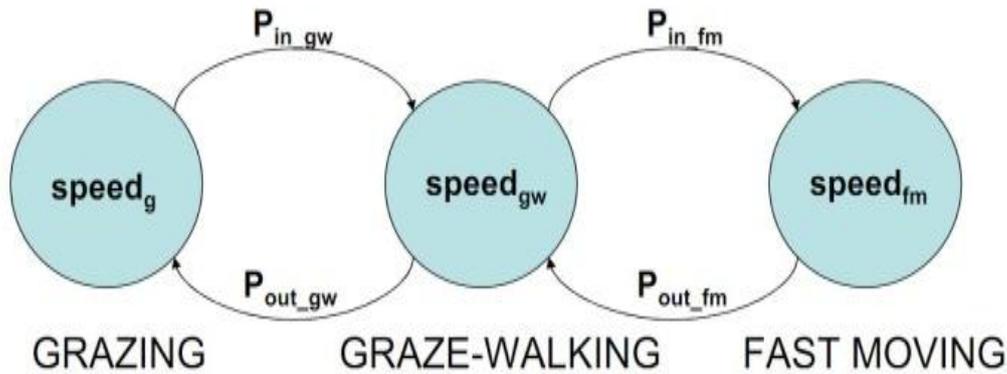


FIG.5.11 – Type de mouvement observé par les biologistes [P. Juang et al., 2002]

c) Notre contribution

Nous nous sommes inspirés du modèle biologiste décrit précédemment pour concevoir notre méthode.

La deuxième méthode aussi utilise le même principe que la première : si l'énergie restante d'un nœud capteur atteint un seuil pré-calculé, il passe du mode détection au mode relais. Mais cette méthode se diffère de la première dans les points suivants :

1. Le modèle de mobilité de chaque nœud.
2. L'énergie résiduelle de chaque nœud.
3. La définition et l'utilisation du seuil: le seuil est calculé en utilisant les contraintes (1) et (2).
4. Le modèle de mobilité et l'énergie résiduelle varient d'un nœud à un autre.

1. La formule utilisée pour le calcul du seuil

Comme déjà mentionné plus haut, pour le calcul du seuil nous avons deux contraintes à tenir en compte :

- L'énergie résiduelle de la batterie qui se diffère d'un nœud à un autre
- La mobilité du nœud.

En fonction de ces deux contraintes nous proposons la formule suivante pour le calcul du seuil :

$$Threshold = \frac{E_{tot}}{E_{res}} * E_{tot} + P * E_{mob} \quad (5.13)$$

Où :

E_{Tot} : l'énergie totale consommée calculée par la formule (5.8).

E_{res} : l'énergie résiduelle du nœud capteur.

P : la probabilité de transition d'un état à un autre (la transition entre les différents modèles de mobilité).

E_{mob} : L'énergie consommée par la mobilité (la consommation d'énergie augmente proportionnellement à la vitesse du capteur).

Pour obtenir les probabilités de transition entre les différents modèles de mobilité, nous nous inspirons du modèle proposé par les biologistes (figure 5.11). Comme indiqué précédemment les nœuds changent de vitesse au fil du temps d'une manière aléatoire. Et aussi la probabilité de transition entre la vitesse actuelle et la prochaine vitesse dépend seulement de la vitesse actuelle du nœud. De cette manière, le nœud change d'état (modèle de mobilité) au fil du temps en suivant une probabilité P . Pour obtenir ces probabilités nous utilisons *les chaînes de Markov*. Mais avant de présenter notre modèle nous donnons un aperçu sur les chaînes de Markov

- *Chaîne de Markov*

Une chaîne de Markov [Pierre Bremaud, 2008] décrit l'évolution d'un processus au fil du temps. Le processus peut prendre un nombre fini d'états $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$. Le processus passe de l'état actuel s_i au prochain état s_j avec une probabilité p_{ij} . La transition entre l'état actuelle et l'état prochain ne dépend que de l'état actuel et non pas de la séquence d'états qui l'ont précédé.

Les probabilités p_{ij} sont appelées *les probabilités de transition*. Les probabilités vérifient les deux contraintes suivantes :

1. $0 < p_{ij} < 1$.
2. $\sum_{j=0}^n p_{ij} = 1$.

Les probabilités de transition sont représentées en utilisant une matrice appelée, *la matrice de transition*. Donc, l'ensemble des états et la matrice de transition caractérisent complètement la chaîne de Markov.

2. Notre modèle

En supposant que chaque nœud est un zèbre, nous modélisons le mouvement du zèbre avec une chaîne de Markov. En fait, notre travail est consacré à la mobilité des zèbres. Selon les observations des biologistes, montrées dans la section précédente, nous définissons trois classes pour la mobilité du zèbre :

1. Faible mobilité qui correspond à l'état pâturage
2. Une mobilité moyenne qui correspond à l'état pâturer en marchant.
3. Forte mobilité qui correspond à l'état mouvement rapide.

Ainsi, nous aurons un ensemble d'états S qui contient trois états: $S = \{\text{faible mobilité, mobilité moyenne, forte mobilité}\}$.

La figure 5.11 illustre les transitions possibles entre les états observées par les biologistes. Dans notre modèle nous nous n'intéressons pas au comportement des zèbres mais plutôt à la mobilité des zèbres et aussi le temps passé dans chaque état. Pour cette raison, et en plus des transitions entre les états décrites par les biologistes, nous ajoutons trois transitions appelées *l'état lui-même*: {faible mobilité, faible mobilité}, {mobilité moyenne, mobilité moyenne}, {forte mobilité, forte mobilité}. Les différentes transitions entre les états sont présentées dans le diagramme suivant :

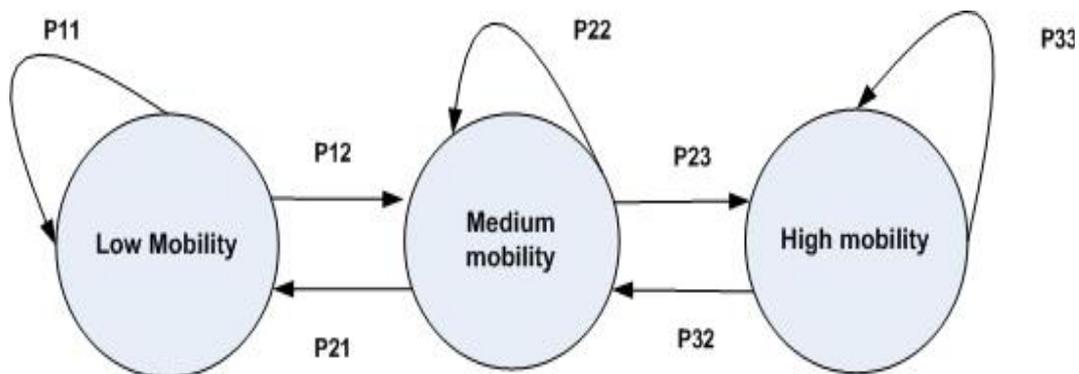


FIG.5.12 – Diagramme montrant les différents états et les différentes transitions

Chaque transition entre les états se produit avec une probabilité P. Ces probabilités sont obtenues à partir de la matrice de transitions décrites ci-dessous :

		Faible	moyenne	forte
$P_{ij=}$	Faible	P_{21}	P_{22}	P_{23}
	Moyenne	P_{11}	P_{12}	P_{13}
	Forte	P_{31}	P_{32}	P_{33}

En fonction des observations et des études faites par les biologistes dans [P. Juang et al., 2002], nous avons pu obtenir les valeurs suivantes qui seront utilisées par la suite pour le calcul du seuil

		Faible	moyenne	forte
$P_{ij=}$	Faible	0,6	0,4	0
	Moyenne	0,4	0,4	0,2
	Forte	0	0,5	0,5

La première ligne de la matrice représente les différentes probabilités de transitions d'état faible mobilité vers les autres états. De même, la deuxième et la troisième ligne représentent respectivement, les probabilités de transitions entre l'état de mobilité moyenne et l'état de forte mobilité vers les autres états.

4. Description de la méthode probabiliste avec un seuil variant (PMVT)

Nous détaillons dans ce qui suit les étapes de notre méthode. Dans cette méthode, nous utilisons un seuil variant pour chaque nœud. Cette méthode comme la méthode PMFT contient deux phases : la phase de changement d'état et la phase du choix du nœud relais.

La phase du choix du nœud relais est composée des mêmes étapes décrites dans la méthode PMFT. Donc nous allons détailler seulement les étapes de la phase du changement d'état.

- *La phase du changement d'état*

1. Au début, tous les nœuds sont synchronisés à dormir / se réveiller en même temps.
2. Dans la période du réveil, chaque nœud calcule son propre seuil en fonction de sa mobilité actuelle en utilisant la formule (5.13).
3. Chaque nœud vérifie le restant de sa batterie:
 - Si le reste de la batterie $<$ seuil alors
 - Le nœud change d'état en mode relais.
 - Sinon le nœud reste en mode de détection.
4. Les étapes ci-dessus (2 à 3) sont répétées tout au long de la durée de vie du réseau.

d) Evaluations des performances

1. paramètres de simulation

Nous évaluons les performances de la méthode PMVT à travers des expériences de simulation. Nous utilisons le simulateur WSNnet. Nous avons choisi comme métriques de performance, la consommation d'énergie moyenne et le retard moyen de bout-en-bout.

1. Nous utilisons des topologies comportant respectivement 20, 40, 60, 80 et 100 nœuds, dispersés d'une manière aléatoire dans une surface de 200 x 200 mètres.
2. Une seule station de base est utilisée, elle est située dans le centre de la zone.
3. Les nœuds sont mobiles, ils se déplacent de manière aléatoire à une vitesse aléatoire générée dans l'intervalle de $[0, 18]$ m/s.
4. L'énergie résiduelle initiale des nœuds est définie au hasard. Elle varie entre 40, 50 et 60 dBm
5. Chaque nœud a la capacité de collecter des données sur l'environnement qui l'entoure puis, il communique ces données à la station de base.

TAB 5.2 résume les paramètres utilisés dans la simulation

Paramètres	Valeurs
Taille de la zone	200mx200m
Durée de Simulation	50s
Nombre de nœuds	20, 40, 60, 80, 100
Puissance de transmission maximale	0 dbm
Puissance de transmission minimale	-30 dbm
Rayon de transmission maximum	200m
Vitesse maximale des nœuds	18m/s
Capacité initiale de la batterie	40, 50, 60 dbm

TAB.5.2 – Les paramètres de simulations

Nous comparons notre méthode au régime sommeil/réveil synchrone en termes de consommation d'énergie et au protocole Greedy et au régime sommeil/réveil synchrone en termes du retard de bout-en-bout

2. Les résultats numériques

- **La consommation d'énergie moyenne au fil du temps et en fonction de la densité du réseau**

Figure 5.13.a et 5.13.b montrent les résultats obtenus pour la méthode PMVT et le régime sommeil/réveil synchrone. Plus précisément, la figure 5.13.a montre l'énergie consommée pour 20 nœuds et la figure 5.13.b montre l'énergie moyenne consommée de différentes densités du réseau.

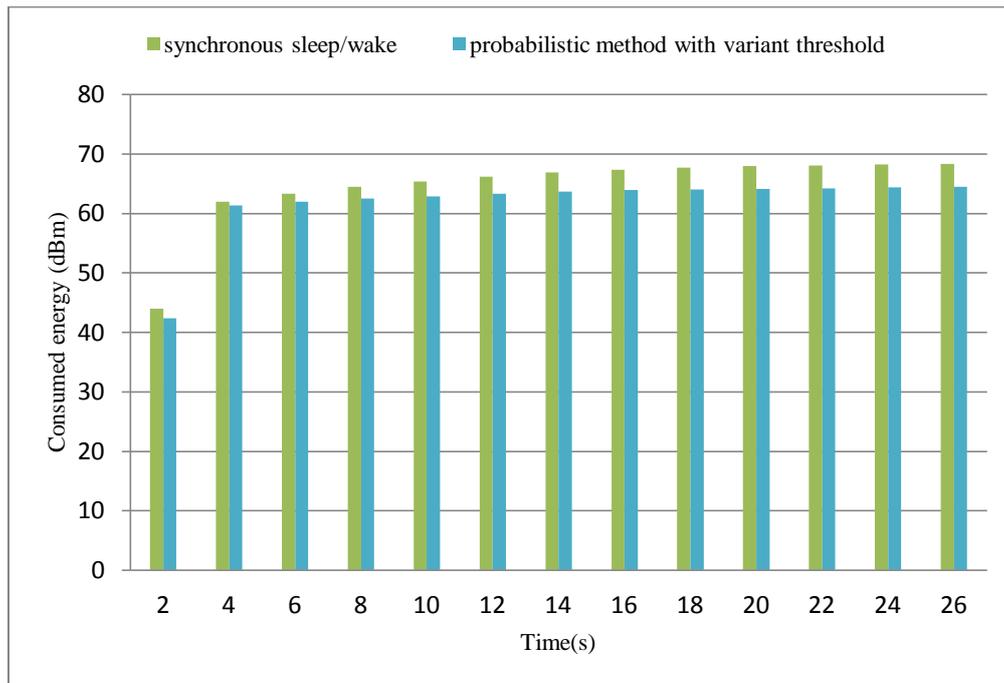


FIG.5.13.a – la consommation d'énergie de la méthode PMVT et le régime sommeil/réveil synchrone au fil du temps

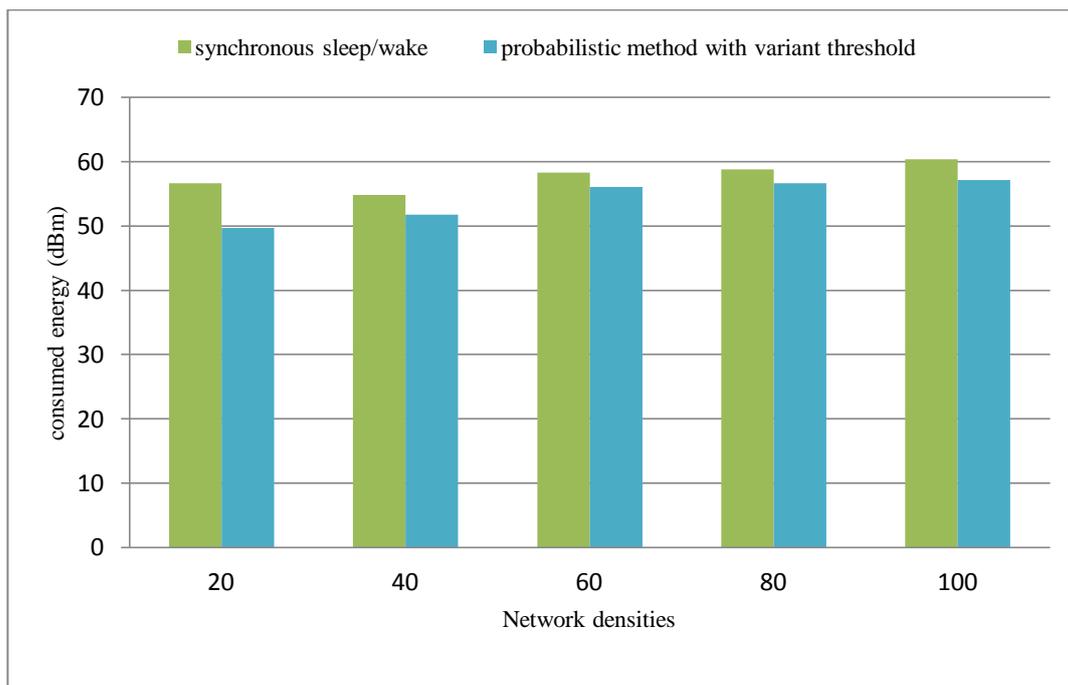


FIG.5.13.b – la consommation d'énergie sous différentes densité du réseau

Discussion

Nous observons dans les deux figures ci-dessus qu'au fil du temps et avec différentes densités du réseau, la méthode PMVT consomme moins d'énergie que le régime sommeil/réveil synchrone. Cela s'explique par le fait que chaque nœud, selon sa mobilité, vérifie périodiquement le reste de sa batterie, si elle est inférieure au seuil pré-calculé le nœud change son mode de fonctionnement du mode détection au mode relais. Ainsi, le nœud peut diminuer l'énergie gaspillée. En revanche, lorsque le nombre de nœuds augmente, le trafic devient important, donc la plupart de l'énergie est gaspillée pour les transmissions et les réceptions des données. Dans une telle situation, quand le nœud change son mode de fonctionnement en mode relais, il consomme de l'énergie juste pour relayer les données de ses voisins. Comme le montre la figure 5.13.b notre méthode PMVT consomme moins d'énergie que le régime sommeil / réveil synchrone avec des densités différentes du réseau.

- **Le retard de bout-en-bout moyen sous différentes densités de réseau**

Les deux figures (5.14.a et 5.14.b) comparent respectivement notre méthode PMVT avec le protocole Greedy et le protocole sommeil/réveil synchrone sous différentes densités du réseau.

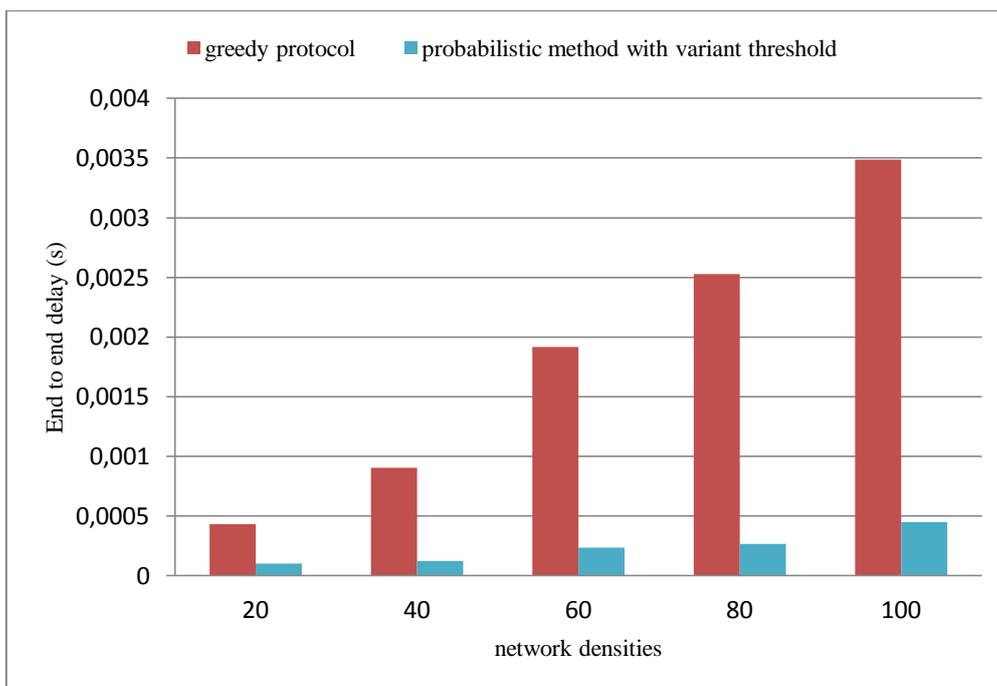


FIG.5.14.a – le retard de bout en bout de PMVT et protocole Greedy

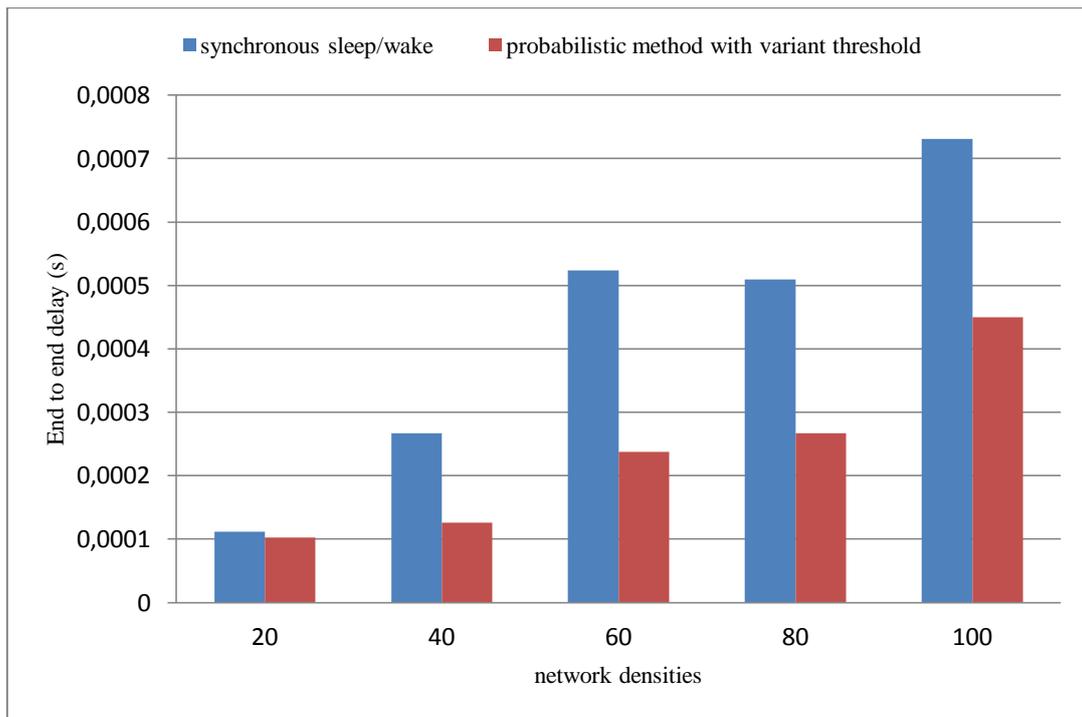


FIG.5.14.b – le retard de bout en bout moyen de PMVT et le régime sommeil/réveil synchrone.

Discussion

D'après les résultats numériques fournis par les deux figures (5.14.a et 5.14.b), nous observons que dans le régime sommeil/réveil synchrone et aussi le protocole Greedy le retard de bout-en-bout augmente avec l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau. Cela est dû au trafic intense généré par les nœuds du réseau. Ainsi, il y'aura plus de collisions et plus de retransmission. Donc, le retard de bout-en-bout augmente significativement.

Les figures montrent également que le retard de bout-en-bout de la méthode PMVT est inférieur que celui généré par le protocole Greedy et le régime sommeil/réveil synchrone. Cela est dû à l'intégration des interférences dans le choix du nœud relais. Lorsque le nœud a un paquet à transmettre il choisit le nœud relais qui a le minimum d'interférences. Dans ce cas, le risque de collision diminue, alors le retard de bout en bout diminue aussi.

5.3 Contribution pour les réseaux de capteurs statiques (Une méthode de contrôle de puissance et de maintien de connectivité)

La troisième contribution continue dans le même axe de conservation d'énergie. Cette méthode contrairement à la première et la deuxième contribution est conçue pour les réseaux de capteurs statiques mais elle est conçue d'une manière à s'adapter au changement topologique (dûe à la mobilité). L'idée principale de cette méthode ressemble à la méthode DPCS, elle vise à ajuster la puissance de transmission de chaque nœud du réseau en se basant sur des informations sur la topologie. Cette méthode est conçue pour atteindre deux objectifs principaux qui sont :

1. La minimisation de l'énergie consommée
2. Assurer une bonne connectivité entre les nœuds du réseau.

5.3.1 Paramètres de conception

L'objectif de notre proposition est de proposer un algorithme générique distribué qui peut être intégré dans de nombreux protocoles de routage pour les réseaux de capteurs multi-sauts.

Cette méthode vise à réduire la consommation d'énergie du réseau sans pénaliser la connectivité qui est une métrique de performance très importante pour les réseaux de capteurs sans fil. Notre algorithme permet d'ajuster la puissance de transmission de chaque nœud en fonction des informations sur la connectivité de ses voisins immédiats (des informations sur les voisins des voisins).

Pour concevoir cette méthode certaines propriétés du réseau sont considérées fondamentales et qui sont :

1. Au début, nous supposons que tous les nœuds du réseau soient statiques, après et dans le but d'étudier les performances de notre méthode dans le cas d'un réseau mobile, nous étalons notre étude sur une topologie dynamique (les nœuds de capteurs sont mobiles).
2. Chaque nœud connaît son identifiant (ID) et sa position GPS.
3. Pour chaque nœud, nous avons la puissance d'émission maximale (P_{max}), afin de garantir la connectivité entre les nœuds, et la puissance d'émission minimale (P_{min}).
4. Initialement, tous les nœuds utilisent la même puissance d'émission (P_{max}) pour se connecter les uns avec les autres.

5. Dans le réseau, tous les nœuds capteurs sont équipés de batteries limitées en énergie. Lorsque l'énergie restante du nœud est inférieure à un seuil donné (le seuil représente l'énergie nécessaire pour transmettre un paquet), le nœud sera considéré comme mort.
6. Les nœuds communiquent entre eux, soit par des liens directs ou via des liens multi-sauts.

5.3.2 La méthode proposée

5.3.2.1 La conception de la méthode

Le but des méthodes de contrôle de puissance de transmission est de délivrer de manière fiable des paquets tout en minimisant la consommation d'énergie, pour prolonger la durée de vie du réseau, sans dégrader la connectivité qui est une métrique de performance très importante dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous proposons une méthode distribuée basée sur le contrôle de puissance, appelé DPCM (*Distributed Power Control method*) [A.Bendjeddou et al., 2014].

Cette méthode permet d'ajuster la puissance de transmission de chaque nœud selon les informations de connectivité de ses voisins immédiats (informations sur les voisins des voisins). Cet ajustement se fait comme suit :

1. Périodiquement, chaque nœud diffuse un message Hello pour se connecter avec ses voisins directs (voisin à un saut).
2. Ensuite, chaque nœud diffuse sa table de voisinage à ses voisins immédiats afin d'obtenir des informations sur les voisins à deux sauts (voisins des voisins).
3. Lors de la réception des tables de voisinages, chaque nœud analyse les tables de voisinages de ses voisins immédiats pour chercher le voisin à un saut qui permet d'atteindre le voisin à deux-sauts le plus éloigné.
4. Une fois trouvé, le nœud ajuste sa puissance d'émission en fonction de ce voisin.

L'ajustement de la puissance de transmission est basé sur les informations de la topologie. Ainsi, afin de souligner les différences majeures entre notre méthode (DPCM) et celles citées dans le chapitre 4, nous résumons la classification des méthodes faite dans le chapitre 4 dans le tableau 5.3, en prenant en compte les principales métriques de performances.

Méthodes De contrôle de puissance	Méthodes basé sur la qualité de lien	Méthodes basé sur les informations topologiques	Métriques de performances				Réseau de capteur multi- sauts
			Connectivité entre les nœuds	Energie consommée	Couverture	Mobilité	
LMA et LMN,2003		✓	✓	✓			✓
Danyan et al. , 2008		✓		✓	✓		✓
TPSO,2012		✓	✓	✓			
ETP,2003		✓	✓	✓			✓
DTP,2003		✓	✓	✓			✓
ATPC,2006	✓		✓	✓			
ODTPC,2008	✓		✓	✓			
OPC-OA- MAC,2009	✓		✓	✓			
LA-TPA ,2012	✓		✓	✓			✓
Jeong et Terzis,2010	✓		✓	✓		✓	
Jang et al., 2009	✓		✓	✓			
Notre méthode DPCM, 2014		✓	✓	✓		✓	✓

TAB 5.3 – Comparaison entre notre méthode DPCM et les méthodes de contrôle de puissance proposées dans la littérature.

5.3.2.2 Description de la méthode DPCM

Nous décrivons dans ce qui suit notre méthode DPCM. La méthode DPCM se compose de trois phases : *la phase de découverte de voisinage*, *la phase de contrôle de puissance* et *la phase de maintenance*.

- *Phase de découverte de voisinage*

Dans cette section nous expliquons les étapes de la phase de découverte de voisinage

1. Lors du déploiement du réseau, chaque nœud initie la phase de découverte de voisinage en utilisant la transmission de puissance maximale (P_{max}) pour se connecter avec ses voisins à un saut. Nous supposons que chaque nœud connaît son identité et sa position GPS notées $N_i (I_d, P_{os})$.
2. Dans cette phase, les nœuds diffusent un message Hello pour connaître leurs voisins immédiats. Le message Hello contient l'identifiant et la position de l'expéditeur.
3. Lors de la réception d'un message Hello, le récepteur vérifie l' I_d de l'expéditeur. Si cette dernière n'existe pas dans sa table de voisinage, le nœud $N_i (I_d, P_{os})$ sera ajouté à la table de voisinage.
4. Après la diffusion d'un message Hello, les nœuds attendent une période de temps T tel que défini dans l'équation (5.14) et (5.15), avant de diffuser les tables de leurs voisins.
5. A la réception des tables de voisinage, les nœuds récepteurs passent à la phase de contrôle de puissance.

$$T_i = t_i + T_x \text{ total interval} \quad (5.14)$$

$$T_x \text{ total interval} = T_x \text{ period}_{\text{per node}} * \text{total SN} \quad (5.15)$$

Où :

t_i : le temps actuel.

$T_x \text{ period}_{\text{per node}}$: la période de transmission par nœud.

Total SN: le nombre total des nœuds dans le réseau (la densité du réseau).

- ***La phase du contrôle de puissance***

Cette phase se déroule comme suit :

1. Quand un nœud reçoit les tables de voisinage de ses voisins immédiats, le nœud récepteur vérifie si les voisins de ses voisins immédiats (voisins à deux sauts) ne sont pas des voisins à un saut. S'ils sont ainsi, le voisin à un saut sera considéré comme voisin à deux sauts (nous considérons qu'il est le voisin à deux sauts afin de réduire davantage la consommation d'énergie et assurer un bon acheminement des paquets) [M. Haenggi and D. Puccinelli, 2005] .
2. Par la suite, le nœud $N_i (I_d, P_{os})$ sera ajouté à la table de voisinage du récepteur.

3. Après cela, chaque nœud cherche dans sa table de voisinage afin de trouver le voisin à un saut $N_i (I_{db}, P_{os})$ qui lui permet d'atteindre le voisin à deux sauts le plus éloigné. Une fois trouvé, la puissance de transmission du nœud sera ajustée en fonction de $N_i (I_{db}, P_{os})$ en utilisant les valeurs mentionnées dans le tableau 5.4 (le tableau est mentionné dans la section évaluation des performances).
4. Si le nœud ne trouve pas un voisin à deux sauts, il garde sa puissance de transmission actuelle.

- *La phase de maintenance*

Le but de cette phase est de maintenir la connectivité entre les nœuds après la phase de contrôle de puissance. Le maintien de la connectivité est réalisé comme suit:

1. Le nœud diffuse périodiquement un message Hello et sa table de voisinage en utilisant sa puissance de transmission actuelle afin de maintenir ses voisins.
2. A un moment donné, en cas de changements dans le voisinage, la phase de contrôle de puissance sera initiée. Ainsi, le nœud réajuste sa puissance de transmission en fonction de son nouveau voisinage.

Nous résumons notre méthode DPCM dans le pseudo algorithme suivant. Ce pseudo algorithme contient les trois phases ensemble.

1. définir: la puissance de transmission $p_{\min} = -25$ et $p_{\max} = 0$; la puissance de transmission courante = p_{\max} ;
2. Initier la phase de découverte de voisinage;
La phase de découverte de voisinage :{
 1. **Pour** chaque noeud (i) {
 2. diffuser message *hello* (*ID*, *Pos*);}
 3. **Pour** chaque nœud *R* recevant le message *hello* {
 4. vérifier le *ID* de chaque paquet reçu;
 5. **Si** (*ID* n'existe pas dans la table de voisinage)
 6. Ajouter *ID* et *position* du nœud dans la table de voisinage; }
 7. Attendre pour T_i unité de temps;
 8. Pour chaque nœud (i) {
 9. diffuser la table de voisinage; }
 10. *description de la phase de contrôle de puissance;*
- La phase de contrôle de puissance:*{
 1. **Pour** chaque nœud (R) recevant la table de voisinag {
 2. cherche dans la table de voisinage;
 3. **Si** voisin à deux sauts et aussi voisin à un saut
 4. Supprimer ce nœud de la table de voisinage du récepteur;}
 5. Chaque nœud explore sa table de voisinage;
 6. Calcule la distance entre lui et ses voisins immédiats
 7. Calcule la distance entre ses voisins et leurs voisins.
 8. Sélectionne le nœud à un saut (N_i) qui permet d'atteindre le voisin à deux saut le plus éloigné
 9. Estime la puissance de transmission nécessaire pour atteindre N_i ;
 10. Définir la valeur de la puissance de transmission.
 11. *description de la phase de maintenance.*}
- La phase de Maintenance :*{
 1. **Pour** chaque noeud (i) {
 2. Diffuser message *hello* (*ID*, *Pos*);}
 3. **Pour** chaque nœud *R* recevant le message *hello* {
 4. vérifier le *ID* de chaque paquet reçu;
 5. **Si** (*ID* n'existe pas dans la table de voisinage)
 6. Ajouter *ID* et *position* du nœud dans la table de voisinage; }
 7. Attendre pour T_i unité de temps;
 8. Pour chaque nœud (i) {
 9. diffuser la table de voisinage; }
 8. Pour chaque nœud (i) {
 9. diffuser la table de voisinage; }
 10. explorer la table de voisinage;
 11. **Si** (y'as des changements dans le voisinage) {
 12. **Aller** à la phase de contrôle de puissance; } }

5.3.2.3 Exemple illustratif de mise en application

Prenons une topologie arbitraire composée de 14 nœuds comme montrée dans la figure 5.15. Les arcs représentent les liens entre les nœuds et les poids représentent les distances qui les séparent.

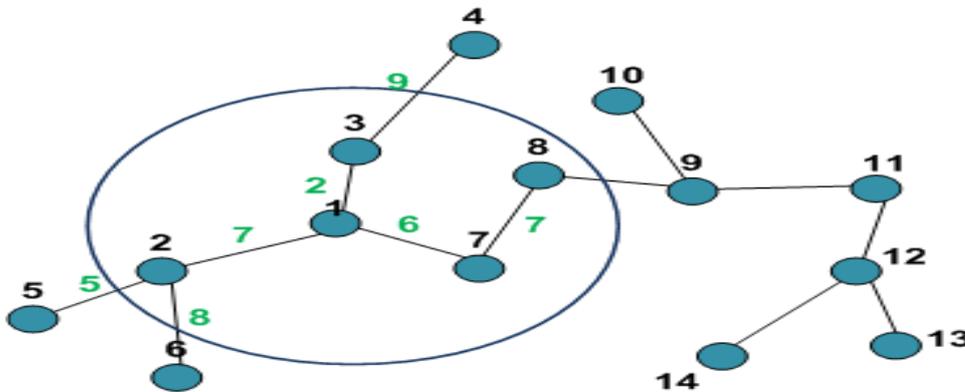


FIG.5.15 – Topologie initiale

Par exemple, le *nœud 1* a quatre nœuds à un saut {2, 3, 7 et 8} et quatre nœuds à deux sauts {4, 8, 6 et 5}. Nous observons que, le *nœud 8* est un voisin à un saut et en même temps un voisin à deux sauts pour le *nœud 1*. Dans ce cas, le *nœud 8* sera considéré comme un voisin à deux-sauts. Le voisin à deux sauts le plus éloigné du *nœud 1* est le *nœud 6*. Donc, le voisin à un saut qui permet au *nœud 1* d'atteindre le *nœud 6* est le *nœud 2*.

Par conséquent, le *nœud 1* va ajuster sa puissance de transmission selon le *nœud 2* comme représenté sur la figure 5.16.

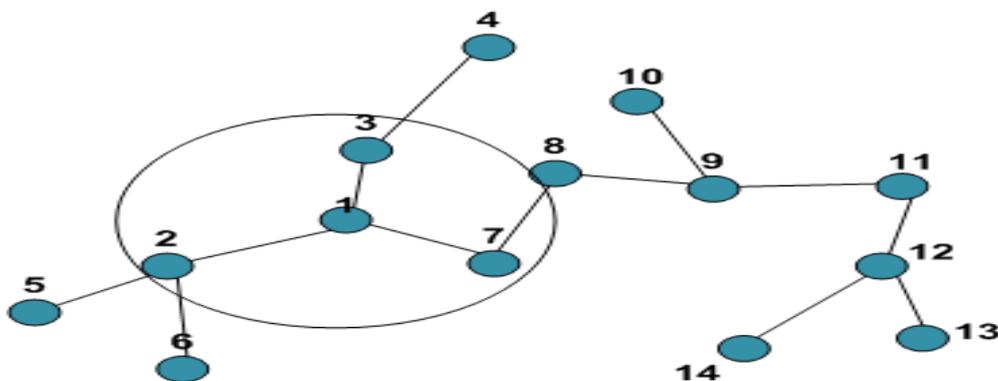


FIG.5.16 – la topologie après la phase de contrôle de puissance

Dans la figure 5.15 on constate que, le *nœud 1* a un grand rayon de transmission. Après la phase de contrôle de puissance, il diminue son rayon de transmission en l'ajustant vers le *nœud 2* comme représenté sur la figure 5.16. Dans ce cas, la puissance de transmission est diminuée.

5.3.2.4 Evaluations des performances

1) Paramètres et modèle de simulation

Toutes les simulations effectuées pour l'évaluation de notre méthode DPCM sont réalisées à l'aide du simulateur Castalia [Athanasios Boulis et al, 2011] .

Le simulateur Castalia est un simulateur dédié pour les réseaux de capteurs sans fil, les réseaux (BAN) et généralement des réseaux comportant des dispositifs embarqués de faible énergie. Il est basé sur la plateforme OMNeT ++. Il offre la possibilité aux chercheurs et aux développeurs de tester leurs algorithmes distribués et/ou des protocoles dans un environnement réaliste, et avec des nœuds dotés d'un comportement réaliste plus particulièrement l'accès à la couche Radio. Castalia peut aussi être utilisé pour évaluer les caractéristiques des supports utilisés pour des applications spécifiques, grâce au fait que celui-ci est entièrement paramétrable et peut simuler une large gamme de supports sans-fil.

Notre simulation se base sur les hypothèses suivantes :

1. Nous avons une topologie de 200 nœuds dispersés d'une manière aléatoire dans une surface de 100 x100 mètres.
2. Tous les nœuds du réseau utilisent le modèle radio CC2420 avec comme puissance de transmission maximale $P_{\max} = 0$ et puissance de transmission minimale $P_{\min} = -25$.
3. En se basant sur le modèle radio CC2420, pour chaque transmission de données le nœud consomme de l'énergie en fonction de la puissance de transmission utilisée comme illustré dans le tableau 5.4. Et pour chaque réception de données il consomme 62mW.
4. Chaque nœud diffuse le message Hello chaque 100ms.
5. Dans les premières simulations les nœuds du réseau sont statiques, par la suite nous utilisons des nœuds mobiles pour analyser l'impact de la mobilité sur notre méthode.
6. Tous les nœuds ont le même montant de la batterie qui est de l'ordre de 9360 joules. Le tableau 5.5, résume les paramètres de simulations utilisées.

Niveau de puissance (dBm)	Rayon de transmission maximum (m)	Energie consommée (mW)
- 25	- 2.82	- 29.04
- 15	- 11.31	- 32.67
- 10	- 16.97	- 36.3
- 7	- 22.62	- 42.24
- 5	- 28.28	- 46.2
- 3	- 33.94	- 50.69
- 1	- 39.59	- 55.18
- 0	- 45.25	- 57.42

TAB 5.4 – Energie consommée correspondant à chaque niveau de puissance pour le modèle de radio CC2420 [Athanasios Boulis et al, 2011]

Paramètres	Valeurs
Taille de la zone	100mx100m
Durée de simulation	800s
Nombre de nœud de capteur	200
Puissance de transmission maximale	0 dbm
Puissance de transmission minimale	-25 dbm
Capacité initiale de la batterie	9360 joules

TAB 5.5 – Les paramètres de simulation

2) La comparaison

Pour réaliser une étude comparative avec l'existant, nous avons sélectionné deux méthodes de contrôle de puissance qui appartiennent à la même classe que notre méthode (les méthodes basées sur les informations topologiques).

Dans les premières expériences, nous considérons un réseau avec des nœuds statiques. Alors que dans les secondes, nous utilisons un réseau avec des nœuds mobiles.

Dans le cas d'un réseau statique, nous comparons notre méthode avec la méthode du voisin le plus éloigné.

- **La méthode du voisin le plus éloigné [15]** : dans cette méthode le nœud ajuste sa puissance de transmission selon la distance qui correspond au voisin à un saut le plus éloigné.
- Dans les expériences avec des nœuds mobiles nous comparons la méthode DPCM à notre première contribution, la méthode DPCS.

3) Métriques de performances choisies

Notre méthode est conçue pour minimiser l'énergie dépensée et ainsi augmenter la durée de vie du réseau et aussi elle vise à assurer une bonne connectivité du réseau. Pour évaluer les performances de DPCM nous avons choisi les métriques de performances suivantes :

- **L'énergie consommée**: Dans notre simulation, nous nous sommes intéressés à la consommation de la radio dans l'état de transmission et de réception. Le nœud, pour chaque transmission de données, consomme de l'énergie en fonction de la puissance de transmission utilisée tel que décrit dans le tableau 5.4 et pour chaque réception de données il consomme 62mW.
- **La durée de vie du réseau**: la durée de vie du réseau est définie comme le temps écoulé entre l'instant où le réseau commence son fonctionnement et le moment où il n'est plus connecté (en raison de la mort d'un ou plusieurs capteurs).
- **La moyenne des paquets reçus**: cette métrique est utilisée pour mesurer la connectivité entre les nœuds. Soit u et v deux nœuds dans le réseau, nous disons que u et v sont connectés si seulement il existe un chemin entre eux. Pour cette raison, nous allons utiliser la moyenne des paquets reçus comme mesure de performance pour évaluer la qualité des liens entre les nœuds. Ainsi, l'augmentation du nombre de paquets reçus implique une bonne connectivité [Athanasios Boulis et al, 2011] .

4) Les résultats numériques

a) Dans le cas d'un réseau statique

- L'énergie consommée

Dans cette expérience, nous calculons la consommation d'énergie de la transmission et de la réception des données. Les nœuds diffusent périodiquement des données, et pour chaque transmission de données, les nœuds consomment de l'énergie en fonction de la puissance de transmission utilisée et pour chaque réception de données ils consomment 62mW.

La figure 5.17 représente l'énergie consommée en moyenne pour notre méthode DPCM et la méthode du voisin le plus éloigné.

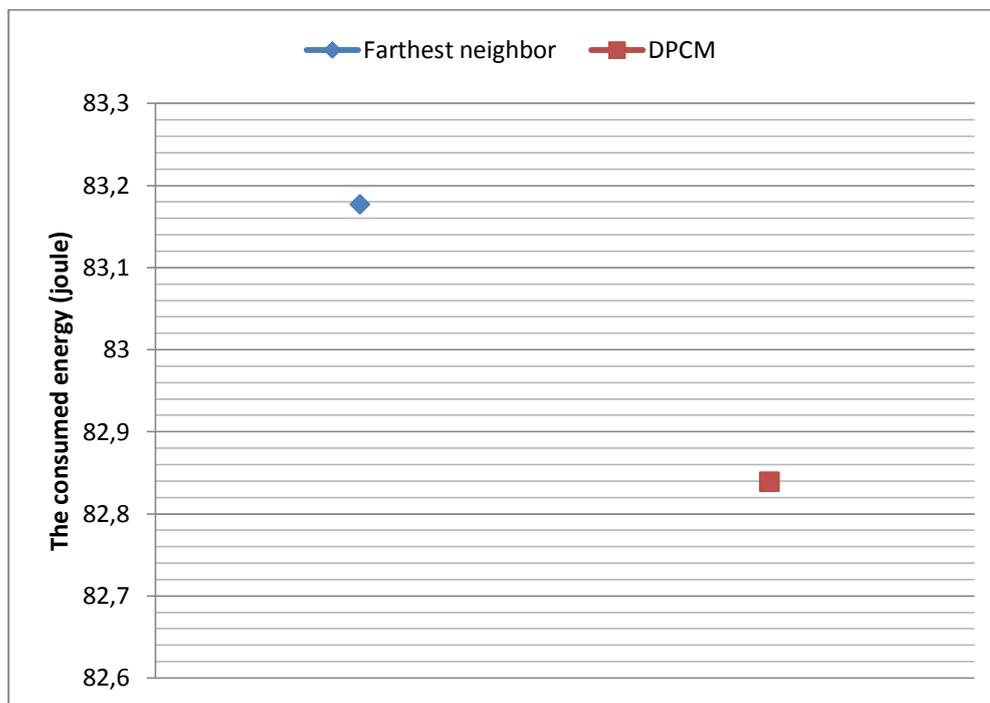


FIG.5.17 – l'énergie moyenne consommée

Discussion

Dans la figure ci dessus, nous observons que la consommation d'énergie de DPCM est optimisée par rapport à la méthode du voisin le plus éloigné. Ceci s'explique par le fait que, quand un nœud diminue sa puissance de transmission, moins d'énergie est consommée. Pour plus de détail, DPCM ajuste la puissance de transmission de chaque nœud en fonction de la distance qui correspond au voisin à un saut qui permet d'atteindre le voisin à deux sauts le

plus éloigné. Dans ce cas, seulement la puissance nécessaire est utilisée contrairement à la méthode du voisin le plus éloigné. A partir de ces résultats, nous constatons que notre méthode utilise la puissance de transmission d'une manière optimale.

- **La durée de vie du réseau**

Dans notre expérience, la durée de vie du réseau est définie comme le temps écoulé entre l'instant où le réseau commence à fonctionner jusqu'à ce qu'un nœud épuise son énergie (il sera considéré comme mort). On considère le nœud de capteur comme mort lorsque son énergie restante est inférieure à un seuil donné (le seuil représente l'énergie nécessaire pour transmettre un paquet). La durée de vie achevée par notre méthode DPCM et la méthode du voisin le plus éloigné est représentée sur la figure 5.18.

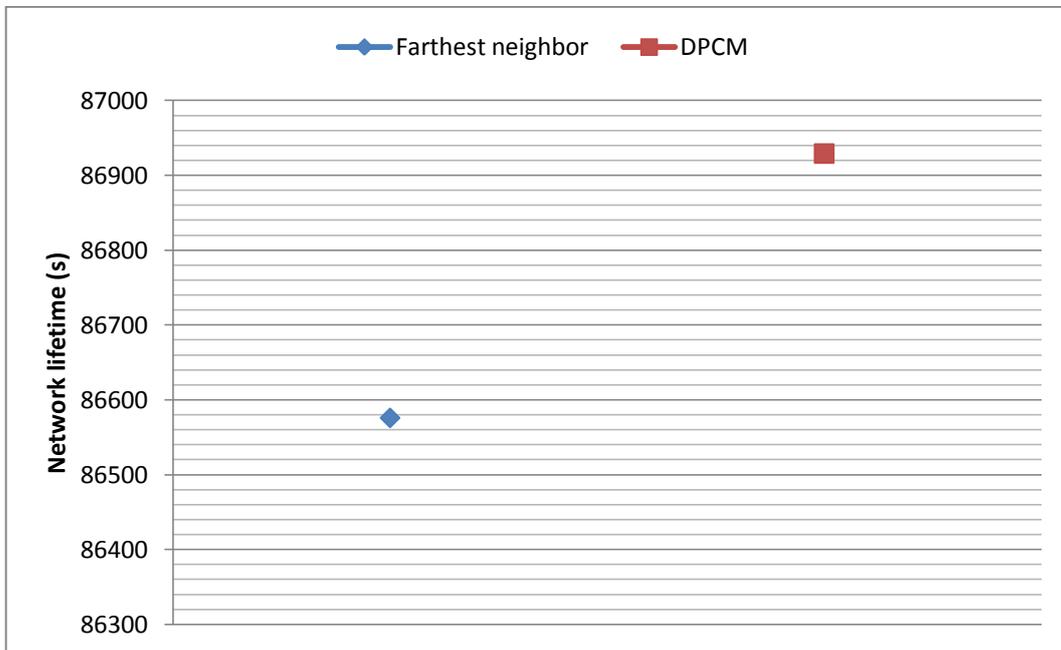


FIG.5.18 – La durée de vie du réseau

Discussion

Dans la figure 5.18, nous observons que la durée de vie du réseau achevée par la méthode DPCM est améliorée par rapport à celle achevée par la méthode du voisin le plus éloigné. Ceci s'explique par le fait que, DPCM optimise l'énergie dépensée par chaque nœud comme le montre la figure 5.17. Lorsqu'un nœud consomme moins d'énergie en moyenne, une augmentation de sa durée de vie est remarquée.

- **La connectivité**

Pour mesurer la connectivité entre les nœuds, nous avons calculé la moyenne des paquets reçus par chaque nœud. Dans cette expérience, chaque nœud est programmé pour transmettre 100 paquets à un intervalle de temps unique, de sorte qu'il n'y aura pas de collisions avec les autres nœuds, un nœud lorsqu'il n'est pas en état de transmission il est à l'écoute des paquets entrants et quand un paquet est reçu, il incrémente le compteur des paquets entendu venant de l'expéditeur. A la fin de la simulation, nous calculons la moyenne des paquets reçus. Les résultats sont présentés sur la figure 5.19.

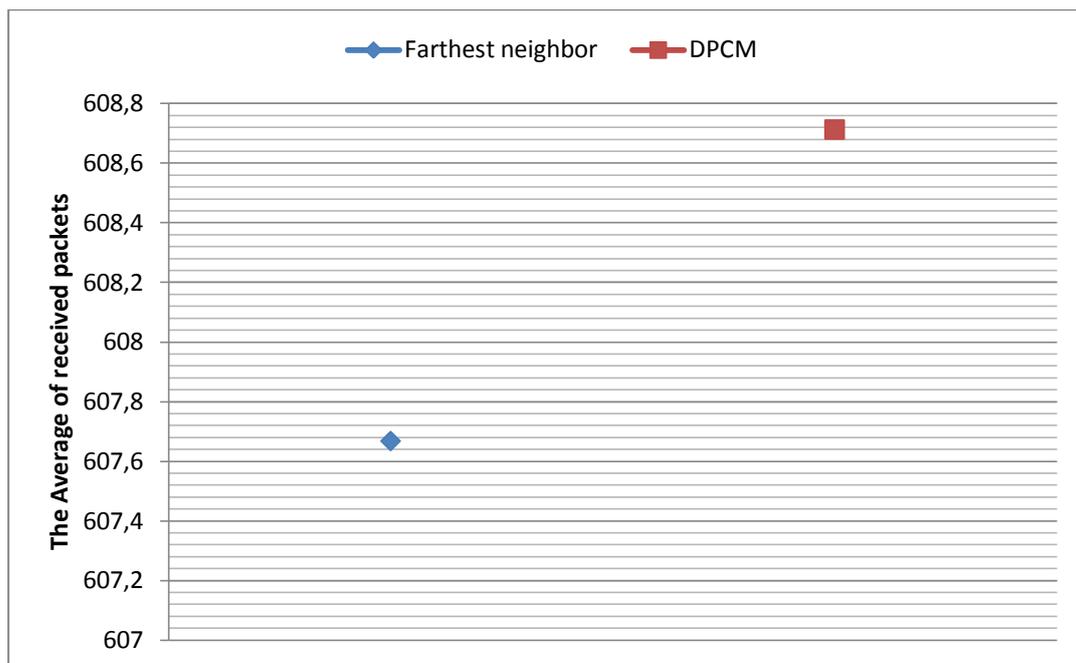


FIG.5.19 – la moyenne des paquets reçus quand les nœuds sont statiques

Discussion

La figure ci dessus montre que la moyenne des paquets reçus dans la méthode DPCM est supérieure que dans la méthode du voisin le plus éloigné. Pour plus de détails, l'ajustement de la puissance de transmission en fonction du voisin à un saut qui permet d'atteindre le voisin à deux sauts le plus éloigné permet d'avoir une bonne connectivité entre les nœuds. Donc, DPCM économise l'énergie consommée sans pénaliser la connectivité entre les nœuds.

b) Dans le cas d'un réseau de capteurs mobiles

Afin d'analyser les performances de notre méthode en termes de connectivité et d'énergie consommée dans le cas de réseaux de capteurs mobiles, nous avons utilisé un scénario mobile. Dans ce scénario, nous utilisons 200 nœuds dont 100 sont mobiles.

Les nœuds mobiles se déplacent dans un segment droit (aller et retour), le segment droit est défini par une position de départ et une position d'arrivée. Ce modèle de mobilité est défini dans le simulateur Castalia [Athanasios Boulis et al, 2011]. Les nœuds mobiles se déplacent uniformément à la vitesse de 8 m/s. Dans ces expériences, nous comparons notre méthode à la méthode DPCS. Nous montrerons dans ce qui suit les résultats numériques obtenus.

- **L'énergie consommée**

La figure 5.20 montre l'énergie consommée en moyenne par la méthode DPCM et la méthode DPCS.

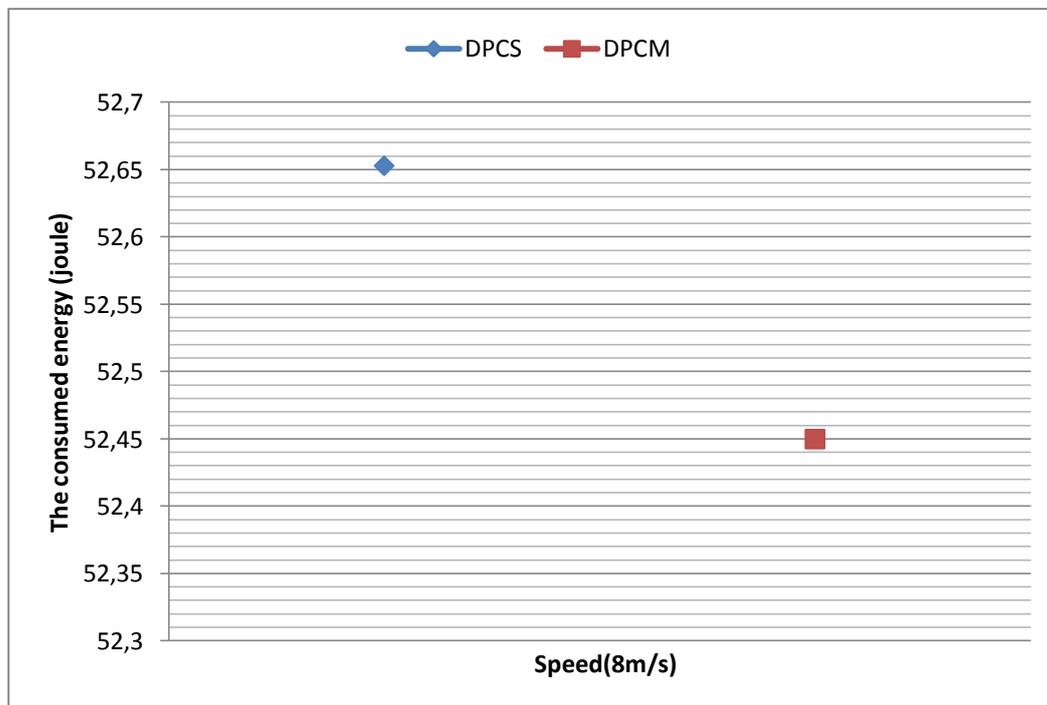


FIG.5.20 – l'énergie moyenne consommée par DPCM et DPCS

Discussion

Dans la figure 5.20 il est démontré que DPCS consomme plus d'énergie que DPCM. Ceci s'explique par le fait que, DPCS utilise un grand rayon de transmission car il ajuste sa

puissance de transmission en fonction du voisin à deux sauts le plus éloigné contrairement à DPCM où la puissance d'émission est ajustée en fonction du voisin à un saut qui permet d'atteindre le voisin à deux sauts le plus éloigné. Par conséquent, DPCS utilise une puissance d'émission supérieure. Ainsi plus d'énergie est consommée en moyenne.

- **La moyenne des paquets reçus**

La figure 5.21 montre le nombre de paquets reçus en moyenne des deux méthodes DPCM et DPCS.

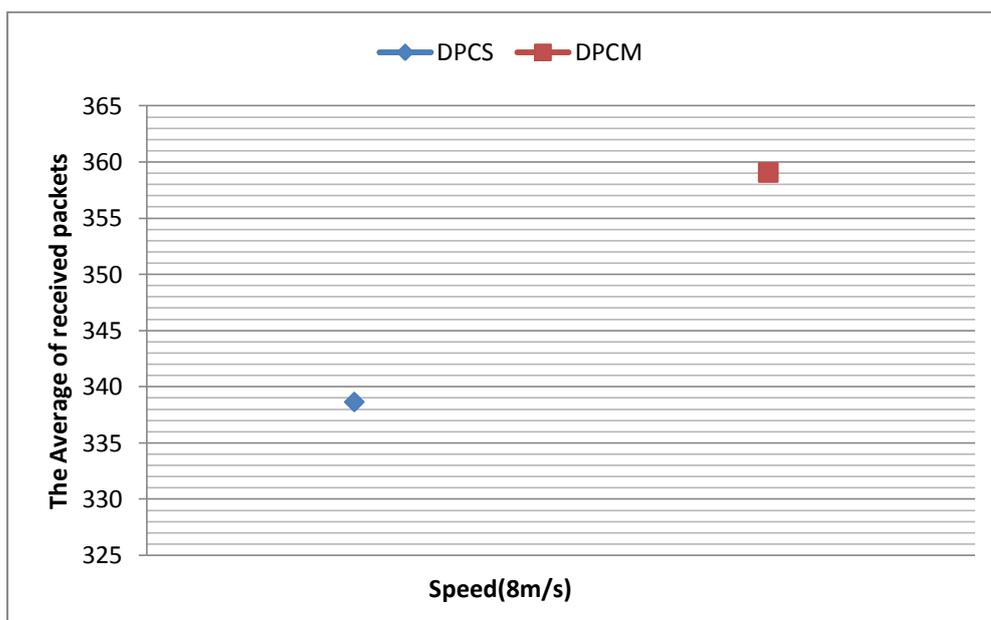


FIG.5.21 – le nombre de paquets reçus en moyenne quand les nœuds sont mobiles

Discussion

La figure ci-dessus montre que la moyenne des paquets reçus de la méthode DPCM est supérieure que la méthode DPCS. A partir de ces résultats, nous pouvons noter que notre méthode répond rapidement à la mobilité des nœuds comparant à la méthode DPCS. En fait, ça montre que DPCM réadapte rapidement sa puissance d'émission par rapport à la méthode DPCS. Ainsi, notre méthode assure une bonne connectivité même lorsque les nœuds sont mobiles.

Puisque la connectivité est un indicateur de performance intéressant en plus de la consommation d'énergie, nous croyons que notre méthode économise considérablement

l'énergie consommée sans pénaliser la connectivité entre les nœuds même dans le cas d'un réseau mobile.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté trois contributions dans le cadre de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil.

Dans la première contribution nous avons présenté une méthode de contrôle de puissance DPCS, conçue pour les réseaux de capteurs sans fil mobiles. L'idée principale de cette méthode consiste à ajuster dynamiquement la puissance de transmission de chaque nœud selon le voisin à deux sauts le plus éloigné.

Nous avons proposé également deux méthodes probabilistes pour le contrôle de l'état du module radio pour les réseaux de capteurs mobiles, en particulier ZebraNet. Ces deux méthodes constituent la deuxième contribution, la méthode PMFT (méthode probabiliste avec un seuil fixe) et PMVT (méthode probabiliste avec un seuil variant). La première méthode utilise un seuil fixe pour tous les nœuds du réseau qui est calculé en utilisant la loi de poisson. Tandis que PMVT utilise un seuil variant pour chaque nœud. Ce seuil variant est calculé en se basant sur la mobilité et l'énergie résiduelle du nœud capteur. Ces deux seuils sont utilisés pour contrôler l'état du module radio. Les deux méthodes PMFT et PMVT réduisent l'énergie consommée par chaque nœud mobile. En outre, elles réduisent le retard moyen de bout-en-bout par l'introduction des interférences comme critère de choix du nœud relais.

Les performances des deux premières contributions ont été validées sous le simulateur WSNNet et il était montré qu'elles ont contribué à l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs mobiles.

Pour la troisième contribution, nous avons proposé une méthode de contrôle de puissance de transmission appelé DPCM pour les réseaux de capteurs statiques. Cette méthode permet d'ajuster la puissance de transmission de chaque nœud individuellement sans dégrader la connectivité entre les nœuds. Le nœud ajuste sa puissance d'émission selon le voisin à un saut qui atteint le voisin à deux sauts le plus éloigné. La méthode a été évaluée dans les deux scénarios statique et mobile. Les résultats expérimentaux ont montré qu'elle apporte de bons

résultats même dans la présence de la mobilité. Nous résumons nos trois contributions dans le tableau 5.6.

Contributions	Réseaux de capteurs statiques	Réseaux de capteurs mobiles	Métriques de performances				Réseau de capteur multi-sauts
			Connectivité entre les nœuds	Energie consommée	Latence	Mobilité	
DPCS, 2012		✓	✓	✓	✓	✓	✓
PMFT, PMVT, 2012		✓		✓	✓	✓	✓
DPCM, 2014	✓	✓	✓	✓		✓	✓

TAB 5.6 – Comparaison entre nos trois contribution

Conclusion générale et perspectives

1 Conclusion

Durant cette dernière décennie, Les réseaux de capteurs sont devenus un sujet de discussion de nombreuses communautés scientifiques. L'objectif principal des réseaux de capteurs est la collecte, le traitement et la transmission d'un ensemble de grandeurs physiques de l'environnement dans lequel ils se trouvent. Ces opérations sont gourmandes en termes de consommation d'énergie, qui constitue un facteur crucial pour la durée de vie des capteurs et par conséquent du réseau. Le domaine des réseaux de capteurs soulève d'importantes problématiques de recherche en termes de consommation d'énergie, de communication, de latence, etc. Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans ce cadre là.

Synthèse

Dans cette thèse nous avons d'abord présenté un état de l'art sur les méthodes de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil plus particulièrement les méthodes de contrôle de puissance sur lesquels se reposent deux méthodes de nos contributions.

En se basant sur les limites des techniques proposées dans la littérature, nous avons proposé nos trois contributions comme solutions à ces limites.

- ***1ere contribution*** : Au début, nous nous sommes consacré aux réseaux de capteurs mobiles. Tout d'abord nous avons proposé un algorithme distribué DPCS conçu pour les réseaux de capteurs mobiles pour une bonne gestion de l'énergie consommée tout en assurant une bonne connectivité dans le réseau. L'algorithme DPCS consiste en l'auto-adaptation de la puissance de transmission pour chaque nœud mobile en fonction des voisins à deux sauts. Les résultats de simulations obtenues montrent que la méthode permet de minimiser l'énergie consommée sans dégrader les performances du réseau (connectivité).

- **2^{ème} contribution** : La deuxième contribution s'inscrit dans le domaine d'application de la supervision de l'habitat écologique plus précisément, le réseau Zebranet. Nous avons proposé deux méthodes probabilistes pour le control de l'état de la radio nommées PMFT (*Probabilistic methods with Fixed threshold*) et PMVT (*probabilistic method with varying threshold*). Ces deux méthodes partent de l'idée que le nœud capteur doit sauvegarder une partie de son énergie pour relier les données de ses voisins et ainsi assurer que les informations atteignent la station de base. Par ailleurs, elles ont aussi comme objectif de réduire la latence. Ces deux méthodes vérifient périodiquement le restant de la batterie, si ce dernier est inférieure à un seuil pré-calculé, le nœud change son état du mode détection au mode relais, ainsi il diminuera le nombre de transmission des données. Afin de réduire la latence, elles introduisent les interférences comme critère de sélection des nœuds relais. PMFT et PMVT se différencient dans leur manière de calculer le seuil. La première méthode calcule un seuil fixe pour tous les nœuds du réseau. Tandis que la deuxième calcule un seuil variant pour chaque nœud basé sur les observations des biologistes. Les performances de ces deux méthodes ont été démontrées grâce à des scénarios de simulations. Les résultats obtenus ont été satisfaisants en termes d'énergie et de latence.

- **3^{ème} Contribution** : Pour les réseaux de capteurs statiques multi sauts, nous avons proposé une méthode distribuée de control de puissance appelé DPCM (*Distributed Power Control method*). Cette méthode a pour but d'optimiser l'énergie dépensé en phase de communication et assurer une bonne connectivité dans le réseau même dans la présence de mobilité ce qui fait son originalité. DPCM adapte la puissance de transmission de chaque nœud capteur en fonction des voisins à un et deux sauts. Les résultats des simulations démontrent que la méthode DPCM diminue l'énergie consommée et assure une bonne connectivité. En outre, cette méthode a été validée dans un réseau à une mobilité moyenne, les résultats ont montré que cette méthode peut assurer de bons résultats pour une éventuelle utilisation dans les réseaux de capteurs mobiles.

2 Perspectives

Les travaux effectués dans cette thèse dégagent de nombreuses perspectives de recherche qui méritent d'être explorés que ce soit pour les méthodes proposées pour les réseaux mobiles ou les réseaux statiques.

- ***Pour les méthodes proposées pour les réseaux mobiles***

- vu la taille des grands réseaux et la quantité d'informations véhiculée sur le réseau, il serait judicieux que la procédure de réorganisation du réseau s'adapte à la dynamique du réseau. Par exemple, la fréquence d'envoi des messages hello doit s'adapter à la mobilité des nœuds, ou envoyer les messages hello sauf si il y'a un changement dans le voisinage.
- Les méthodes présentées été validées seulement par des simulations, nous envisageons dans nos travaux futures de faire une évaluation analytique en modélisant le réseau à l'aide des chaine de Markov dynamique. Il serait aussi plus intéressant de mettre en œuvre les méthodes proposées et réaliser une évaluation réelle.

- ***Pour la méthode DPCM***

Nous envisageons de tester cet algorithme dans un environnement à forte mobilité et différentes directions de l'antenne. Nous envisageons également d'exploiter cet algorithme dans les protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil.

Annexes A

Détails sur l'implémentation d'un nouveau module sous le simulateur WSNet et le simulateur Castalia

A.1 Le Simulateur WSNet

L'architecture de WSNet est modulaire, ce qui lui permet de recevoir des extensions développées par les utilisateurs :

- Simulator core : L'ordonnancement des événements (file d'événements, management de la mobilité, ordonnancement des paquets (file de paquets), etc.
- Bibliothèques dynamiques : qui implémentent les nœuds, les « mediums », l'environnement et les modèles.

Pour une simulation donnée, on doit préciser le choix des modèles et des structures à utiliser. Ceci est fait à l'aide des fichiers de configuration XML. Les nœuds, l'environnement et le canal radio sont représentés par des blocs indépendants dans des bibliothèques dynamiques. Par conséquent, l'ajout de nouveaux modèles ne nécessitent pas de modifier la base de WSNet et peut donc être réalisé facilement. Ces caractéristiques confèrent au simulateur une très grande extensibilité.

(1). La programmation des modules sous WSNet

Un module de WSNet est un fichier *.c qui doit contenir les fonctions suivantes :

- **int init (call_t *c, void *params) :** Cette fonction initialise l'entité application et analyse le fichier XML de configuration pour récupérer les paramètres globaux de la simulation.
- **int destroy (call_t *c) :** Cette fonction est appelée à la fin de la simulation pour détruire l'entité application.
- **int setnode (call_t *c, void * params) :** Cette fonction est utilisée pour relier l'entité application à un nœud. Elle analyse le fichier XML pour récupérer les paramètres spécifiques au nœud qu'elle stocke dans une structure **_node_data** spécifiée au début du fichier et résumant les caractéristiques du nœud qu'on désire pour notre application.
- **int unsetnode(call_t *c) :** Cette fonction est appelée à la mort du nœud pour dissocier l'application du nœud.
- **int bootstrap(call_t *c) :** est la fonction appelée automatiquement à la naissance d'un nœud.
- **void rx(call_t *c, packet_t *packet) :** est une fonction utilisée lorsque l'application reçoit un paquet de données.
- **application_methods_t methods = {rx} :** est une structure de données qui décrit les fonctions exportées pour les couches plus basses.

(2). Configuration des simulations

Le simulateur WSNNet utilise un fichier XML pour configurer une simulation. Ce fichier décrit les paramètres de la simulation, par exemple le nombre de nœuds à simuler, les bibliothèques utilisées pour modéliser les nœuds, le canal radio et l'application désirée. Tout d'abord il faut définir les paramètres globaux comme suit:

```
<simulation nodes="number-of-nodes" duration="simulation-duration"
x="size"y="size" z="size" />
```

On peut définir des entités qui sont des instanciations des bibliothèques dynamiques :

```
<entity name=" entity- name" library="Dynamic-library-name" />
<init parameter-name="value" parameter-name = "value"... />
<default parameter-name="value" parameter-name = "value"... />
</entity>
```

Il faut également définir l'environnement avec les entités de propagation, d'interférences et de modulation.

```

<environment>
  <propagation entity="entity-name" />
  <interferences entity="entity-name" />
  <modulation entity="entity-name" />
</environment>

```

Une fois toutes les entités et l'environnement définis, il reste de définir l'architecture du nœud dans le bundle.

```

<bundle name=" bundle- name " default="{true,false}" birth="time" />
  <mobility entity="entity-name" />
  <with entity="entity-name">
    <up entity="entity-name" />
    <...>
    <down entity="entity-name" />
  </bundle>

```

La difficulté majeure consiste dans le choix des modèles et des paramètres, pour la cohérence et la validité de la simulation. Puisqu'il y a beaucoup de paramètres qui sont passés par défaut au simulateur, il faut vérifier sur les modèles les valeurs exigées et les préciser si elles se diffèrent des valeurs par défaut

A.2 le simulateur Castalia

Castalia est basé sur la plateforme OMNeT++. OMNeT ++ est une bibliothèque de simulation écrite en C++ les concepts de base d'OMNeT sont les modules et les messages, un simple module est l'unité de base de l'exécution. Il accepte des messages provenant d'autres modules ou de lui-même, et en fonction du message, il exécute une partie du code. Castalia offre la possibilité de manipuler différentes couches du modèle OSI. En effet il est possible de définir des couches MAC (accès au support de communication), des couches Réseau (routage des paquets) et des couches Application permettant de créer des réseaux de nœuds

statiques. Castalia permet aussi de définir des modules pour les réseaux sans-fil avec des nœuds mobiles.

La figure ci-dessous explique brièvement le fonctionnement d'une application Castalia. On trouve les modules de communication à savoir "Routing" et "MAC" et le module "Radio" qui simule le moyen de transport physique de l'information.

Ensuite vient la couche "Application" et le gestionnaire de capteurs qui vont définir et gérer où sont placés les capteurs, qu'elles sont leurs caractéristiques techniques comme leur énergie, leur portée d'émission, etc.

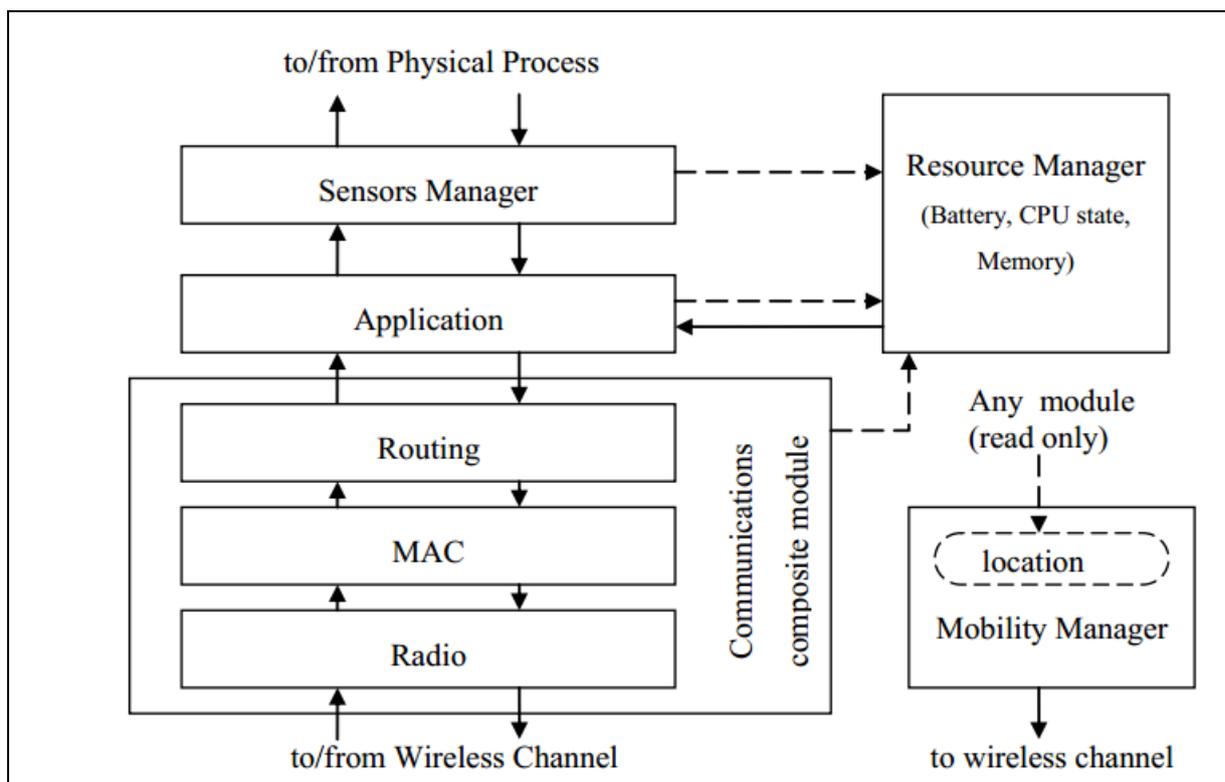


Figure A.1 : Schéma général d'un module Castalia

(1). Création d'un nouveau module Castalia

Pour créer un nouveau module on utilise le langage NED provenant d'OMNeT++, qui permet de définir facilement un nom du module, ses paramètres, ses interfaces (entrées et sorties) et éventuellement un sous-module (dans le cas d'un module composé). Ces informations sont écrites dans un fichier .ned. Pour chaque type de module, Castalia fournit une classe dont il faut hériter ainsi que des méthodes virtuelles à redéfinir pour écrire le code C++ du module lui-même. Sous Castalia on peut introduire un nouvel algorithme distribué en introduisant

notre propre module d'application, on peut également ajouter un nouveau protocole MAC ou routage en introduisant un nouveau module MAC ou Routing, respectivement. On peut aussi ajouter un module de mobilité si on veut définir un nouveau modèle de mobilité. Pour la méthode DPCM nous avons créé un nouveau module Application

La première étape consiste à déterminer l'emplacement correct pour le nouveau code à l'intérieur de la structure de répertoire Castalia et créer un répertoire dédié pour contenir le code source du nouveau module. Les emplacements corrects sont:

Application: src / node / application /

Pour le routage: src / node / communication / routage /

MAC: src / node / communication / mac /

Pour la mobilité: src / node / MobilityManager /

Chacun de ces répertoires comprend déjà plusieurs sous-répertoires contenant différentes implémentations de modules pertinents. Pour notre méthode DPCM nous avons créé un nouveau module dans le répertoire src / node / application /.

Après que le nouveau module est créé, il est nécessaire de définir ce module en utilisant le langage NED (c'est à dire de créer le fichier. ned du module). Ce fichier est créé dans le répertoire dédié du module et est nommé en utilisant le nom du nouveau module. Après avoir déclaré le module à l'aide du fichier NED, nous pouvons créer les fichiers sources C++. Les fichiers qui implémentent le module doivent avoir le même nom que le nom donné au module dans l'interface NED. Le fichier de déclaration C++ doit contenir un héritage du module de base.

Dans le cas d'une couche application il doit hériter de VirtualApplication qui définit une base pour toute application Castalia. Elle définit les méthodes de base pour le fonctionnement de la simulation. et définit un ensemble de méthodes que l'application spécifique peut utiliser pour interagir avec le reste des modules. Il existe deux types de méthodes.

1) les méthodes " Callback" que le code de virtualApp appelle à des points appropriés (lorsque certains événements se produisent) et l'application spécifique doit la définir pour

décrire ce qu'il faut faire lorsque l'événement associé à la méthode de " Callback" se produit (par exemple, la réception d'un paquet).

2) Les méthodes qui sont déjà définies dans virtualApp et l'application spécifique peuvent appeler pour effectuer une certaine action (par exemple, envoyé un paquet à la couche routing, créer un paquet d'application)

- **Les méthodes du Callback :**

- void startup () : Cette méthode est appelée lors de l'initialisation. on effectue toutes les actions d'initialisation requises par l'application.
- void finishSpecific () : Cette méthode est appelée à la fin de la simulation. Parmi les actions habituelles réalisées : libérer la mémoire allouée par certains objets spécifiques, ou collecter des sorties spécifiques à l'application.
- void fromNetworkLayer(ApplicationPacket *packet, const char *srcAddr, double RSSI, double LQI) : Cette méthode virtuelle est obligatoire pour le nouveau module de l'application à définir. Elle est appelée lorsqu'un paquet est reçu à partir de la pile de communication. Ses arguments sont le paquet lui-même, les valeurs de RSSI et IQT pour ce paquet (mesurée par la radio), ainsi que l'adresse source d'où provient le paquet.
- void handleSensorReading(SensorReadingMessage *) : Cette méthode est appelée à chaque fois qu'une lecture du capteur est renvoyée par le dispositif de détection.
- void handleNetworkControlMessage(cMessage *),
void handleMacControlMessage(cMessage *),
void handleRadioControlMessage(RadioControlMessage *) : Ces méthodes nous permettent de réagir aux messages de contrôle de différentes couches de communication.

Le reste des méthodes offertes par VirtualApp peuvent être appelé à partir de l'application spécifique pour effectuer certaines actions.

- void requestSensorReading(int index) : pour demandez une lecture du capteur avec un indice donné
- void toNetworkLayer(cMessage *msg) : envoie un message de contrôle à la pile de communication. A noter qu'un message de contrôle n'est pas un paquet de données (c'est une commande aux couches de communication qui se situe au dessous).
- void toNetworkLayer(cPacket *pkt, const char *dstAddr): envoie un paquet de données à la pile de communication, pour qu'il soit remis à l'adresse donnée.

- `ApplicationPacket *createGenericDataPacket (double data, int sequenceNum, int size) :`
Crée un paquet de données avec un nombre de type double comme donnée, un numéro de séquence, et une taille optionnelle.

Bibliographie

[A. DUNKELS et al., 2004] A. DUNKELS, B. GRONVALL, and T. VOIGT. Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors Local Computer Networks. Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04), pages 455 - 462, ISSN : 0742-1303, 2004.

[A. Dunkels et al., 2006] A. Dunkels, O. Schmidt, T. Voigt, and M. Ali . Protothreads : simplifying event-driven programming of memory-constrained embedded systems. Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems, pages 29–42, ISBN: 1-59593-343-3, 2006.

[A. Dunkels, 2003] A. Dunkels. Full TCP/IP for 8 bit architecture. In proceedings of First ACM/Usenix International conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys 2003), Pages 85-98, San Francisco, USA, 2003.

[A. Jardosh et al., 2003] A. Jardosh, E. M. Belding-Royer, K. C. Almeroth, and S. Suri. Towards Realistic Mobility Models for Mobile Ad hoc Networks. In Proceedings of Ninth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2003), San Diego, CA, pages 217-229, ISBN: 1-58113-753-2, September 2003.

[A. Kansal et al., 2004] A. Kansal, A. A. Somasundara, D. D. Jea, M. B. Srivastava, D. Estrin. Intelligent fluid infrastructure for embedded networks. In Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys), New York, ACM, pages 111–124, ISBN: 1-58113-793-1, 2004.

[A. M et al., 2002] Alan Mainwaring, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, David Culler, John Anderson. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications (WSNA '02), ACM, New York, NY, USA, ISBN:1-58113-589-0, pages 88-97, 2002.

[A. Manjeshwar and D.P, 2001] A. Manjeshwar and D.P. Agrawal. TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April 2001

[A. Safwat and H. H, 2002] A. Safwat and H. Hassanein. Infrastructure-based routing in wireless mobile ad hoc networks. International Journal of Computer Communications, volume 25, no 3, pages 210-224, 2002.

[A. Tiderko et al., 2008] A. Tiderko, T. Bachran, F. Hoeller, D. S. RoSe: a framework for multicast communication via unreliable networks in multi-robot systems Robot. Journal Robotics and Autonomous Systems, volume 56 , no 12, pages 1017–1026, 2008

[A.Bendjeddou et al., 2012] A. Bendjeddou, F. Djemil Tolba, N. Ghoualmi, P. Lorenz. Distributed scheme for transmission Power Control in Mobile wireless sensor networks. The Mediterranean Journal of Computers and Networks, volume 8, no. 2, pages 42-48, ISSN: 1744-2397, April 2012 .

[A.Bendjeddou et al., 2015]. Amira Bendjeddou, Nacira Ghoualmi, Congduc Pham. A new method for prolonging network lifetime and maintaining the connectivity in wireless sensor network through controlling the transmission power. International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS), volume 5, no 1, pages 1-14, ISSN: 1947-3176, 2014

[A.Bendjeddou, N.Ghoualmi, 2012] Amira Bendjeddou, Nacira Ghoualmi. Probabilistic Methods based on Energy's Threshold in Switching Mode of Mobile Wireless Sensor for Surveillance Application. International Journal of Computer Applications, volume 48, no 11, pages 40-47, 2012.

[Abdallah Makhoul ., 2008] Abdallah Makhoul. Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données. Thèse de doctorat soutenue le Vendredi 14 novembre, l'Université de Franche-Comté, 2008.

[Adam D et al., 2007] Adam DUNKELS, Frederik OSTERLIND et Zhitao HE. An adaptive communication architecture for wireless sensor networks. Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '07.), pages 335-349, ISBN: 978-1-59593-763-6, 2007.

- [Ali et al., 2008] Ali, M. Bohm, A. Jonsson, M. Wireless Sensor Networks for Surveillance Applications – A Comparative Survey of MAC Protocols. Proceedings of The Fourth International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC '08) , pages 399 – 403, ISBN: 978-0-7695-3274-5, 2008.
- [Alippi et al., 2007] Alippi, C. Anastasi, G. Galperti, C. Mancini, F. Roveri, M. Adaptive Sampling for Energy Conservation in Wireless Sensor Networks for Snow Monitoring Applications. In proceedings of IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, pages 1-6, ISBN: 978-1-4244-1454-3, 2007.
- [Antoine G et al., 2007] Antoine Gallais, Jean Carle et David Simplot-Ryl. La k-couverture de surface dans les réseaux de capteurs. IRCICA/LIFL, Université. Lille 1, INRIA Futurs, 2007
- [Athanassios Boulis et al, 2011] Athanassios Boulis et al. Castalia: A Simulator for Wireless Sensor Networks, disponible au <http://castalia.npc.nicta.com.au/>, 2011.
- [B. Karp and H. T. Hung, 2000] B. Karp and H. T. Hung. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless sensor networks. In Proceedings of 6th ACM MOBICOM, pages 243-254, ISBN: ISBN:1-58113-197-6, 2000.
- [B. Kus'y et al., 2007] B. Kus'y, A. L'edeczi, X. Koutsoukos. Tracking mobile nodes using RF Doppler shifts. In SenSys 2007 proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems, ACM, New York, pages 29–42, ISBN: 978-1-59593-763-6, 2007.
- [Basma M et al., 2013] Basma M. Mohammad El-Basioni, Sherine M. Abd El-kader and Mahmoud Abdelmonim Fakhreldin. Smart Home Design using Wireless Sensor Network and Biometric Technologies. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, Volume 2, Issue 3, pages 413-429, 2013.
- [Bhavyesh et al., 2007] Bhavyesh Divecha , Ajith Abraham , Crina Grosan , Sugata Sanyal. Impact of Node Mobility on MANET Routing Protocols Models. Journal of Digital Information Management, Volume 5, Number 1, pages 19-24, 2007.
- [Bor-rong et al, 2006] Bor-rong Chen, Kiran-Kumar Muniswamy-Reddy, Matt Welsh. Ad-hoc multicast routing on resource-limited sensor nodes. Proceedings of the 2nd international

workshop on Multi-hop ad hoc networks: from theory to reality, pages 87 – 94, ACM New York ,2006.

[C.R. Lin and M. G, 1997] C.R. Lin and M. Gerla. Adaptive clustering for mobile wireless networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Volume 15, No 7, pages 1265-1275, 1997.

[C.Y and S.P, 2003] C.Y. Chong and S.P. Kumar. *Sensor Networks : Evolution, Opportunities, and Challenges*. In *Proceedings of the IEEE*, Volume 91, No 8, pages 1247-1256, 2003.

[Catherine Forbes et al., 2010] Catherine Forbes, Merran Evans, Nicholas Hastings, Brian Peacock. *Statistical Distributions*, ISBN-13: 978-0470390634, Edition 4, 2010.

[Chih-C et al., 2005] Chih-Chieh Han, Ram Kumar, Roy Shea, Eddie Kohler and Mani Srivastava. A Dynamic Operating System for Sensor Nodes. In *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '05)*, New York, NY, USA, pages 163–176, ISBN:1-931971-31-5, 2005.

[Chun-H et al., 2007] Chun-Hsien Wu, Yeh-Ching Chung. Heterogeneous Wireless Sensor Network Deployment and Topology Control Based on Irregular Sensor Model. In *proceedings of Second International Conference (GPC 2007)*, Paris, France, pages 78-88, ISBN: 978-3-540-72359-2, 2007.

[Curt .S et al., 2002] Curt Schurgers, Vlasios Tsiatsis, Saurabh Ganeriwa, Mani Srivastava. Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space., *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Volume 1 no 1, pages 70-80, ISSN: 1536-1233, 2002.

[Curt Shurgers et al., 2002] Curt Shurgers, Valasion Tsiatsis, and Mani B.Srivastava. STEM:Topology management for energy efficient sensor networks. In *proceeding of the IEEE Aerospace conference*, , Big Sky, Montana,USA, Volume 3, pages 78-89, 0-7803-7231-X, 2002.

[D. Gay et al., 2003] D. Gay, P. Levis, R. von Behren, E. Brewer Welsh, and David E. Culler. The nesc language : A holistic approach to networked embedded systems. In *ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation*, San Diego, CA, USA, ISBN:1-58113-662-5, pages 1 – 11, 2003.

[D. Mouchiroud, 2002] D. Mouchiroud, "Mathématiques : Outils pour la Biologie – Deug SV1 – UCBL", Chapitre 4 Lois de Probabilité, 2002. PDF disponible sur : <http://spiral.univ-lyon1.fr/mathsv/cours/pdf/stat/Chapitre4.pdf>.

[D. Son et al., 2004] D. Son, B. Krishnamachari, and J. Heidemann. Experimental Study of the Effects of Transmission Power Control and Blacklisting in Wireless Sensor Networks. Proceeding of IEEE SECON, pages 289 – 298, ISBN: 0-7803-8796-1, 2004.

[Danyan L et al., 2008] Danyan Luo, Decheng Zuo; Xiaozong Yang, "An Energy-Saving Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM '08, pp 1-4, 2008.

[E.M et al., 2000] E.M. Petriu, N.D. Georganas, D.C. Petriu, D. Makrakis, and V.Z. Groza. Sensor-based information appliances. IEEE Instrumentation Measurement Magazine, Volume 3, No 4, pages 31-35, ISSN: 1094-6969, 2000.

[E. Shih et al., 2001] E. Shih, S. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, A. Chandrakasan, Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks, Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking, New York, NY, USA, pages 272 – 286, ISBN: 1-58113-422-3, 2001.

[Emeka and Abraham, 2011] Emeka E. Egbogah and Abraham O. Fapojuwo, "A Survey of System Architecture Requirements for Health Care-Based Wireless Sensor Networks", Sensors, Volume 11, No 5, pages 4875-4898, 2011

[Eylem Ekici et al., 2006] Eylem Ekici, Yaoyao Gu and Doruk Bozdog. Mobility-based communication in wireless sensor networks. IEEE Communications Magazine, Volume: 44, Issue: 7, pages : 56 – 62, ISSN : 0163-6804, 2006.

[F. Djemili et al., 2007] F. Djemili Tolba, D. Magoni and P. Lorenz. Connectivity, energy and mobility driven clustering algorithm for mobile ad hoc networks. In Proceeding of the IEEE Globecom, USA, pages 2786 – 2790, ISBN: 978-1-4244-1042-2, 2007.

[F. Lavratti et al., 2012] F. Lavratti, A. Ceratti, D. Prestes, A. R. Pinto, L. Bolzani, F. Vargas, C. Montez, F. Hernandez, E. Gatti, and C. Silva. A Transmission Power Self-Optimization Technique for Wireless Sensor Networks. International Scholarly Research Network ISRN Communications and Networking, pages 1-12, 2012.

[F.Brissaud et al., 2008] F.Brissaud, D.Charpentier, A.Barros et C.Barenguer. Capteurs intelligents : nouvelles technologies et nouvelles problématiques pour la sureté de fonctionnement. 16ème Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement Lambda-Mu 16, Avignon, France, pages 1-8, 2008.

[G. Wang et al., 2005] G. Wang, G. Cao, T. Porta, W. Zhang. Sensor relocation in mobile sensor networks. In proceedings of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM 2005), Volume 4, pages 2302 – 2312, ISSN: 0743-166X, 2005.

[G. Cao et al., 2006] G. Cao, G. Kesidis, T. L. Porta, B. Yao, and S. Phoha. Purposeful mobility in tactical sensor networks. Network Operations, Wiley-IEEE, 2006.

[G. Hackman et al., 2008] Gregory Hackman, Otav Chipara, and Chenyang Lu, “Robust Topology Control for Wireless Sensor Networks. In proceeding of the ACM Sensys, November 2008.

[G. Lu et al., 2004] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. Raghavendra. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in sensor networks. In proceeding of 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, ISBN: 0-7695-2132-0, 2004.

[G. Pottie, W.K, 2000] G. Pottie, W. Kaiser. Wireless integrated network sensors. In Communication of ACM magazine. Volume 43, No 5, pages 51–58, 2000.

[Geetha et al.,2008] Geetha Jayakumar and Gopinath Ganapathi. Reference point group mobility and random waypoint models in performance evaluation of MANET routing protocols. Journal of Computer Systems, Networks and Communications, Volume 2008, No 3, 2008.

[Giuseppe A et al., 2008] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Andrea Passarella, Luciana Pelusi. Mobile-relay Forwarding in Opportunistic Networks. Chapter 13 in Adaptive Techniques in Wireless Networks, Ibmkahla editor, Pages 389–418, ISBN: 978-1-4200-4603-8, 2008.

[H. Namgoog et al., 2005] H. Namgoog, D. Lee, and D. Nam. Energy efficient topology for wireless microsensor networks. In Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks (PE-WASUN), Pages 25-33, ISBN:1-59593-182-1, 2005.

- [I. Akyildiz et al., 2002] I. Akyildiz, W. Su, E. Cayirci, Y. Sankarasubramaniam. A survey on sensor networks. In *IEEE Communications Magazine*, Volume 40, No 8, pages 102-114, ISSN: 0163-6804, 2002.
- [I. Amundson, 2008] I. Amundson, X. Koutsoukos, J. Sallai. Mobile sensor localization and navigation using RF doppler shifts. In *1st ACM International Workshop on Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments (MELT'08)*, San Francisco, CA, USA, 2008.
- [I.F.Akyildiz et al., 2002] I.F.Akyildiz,W.Su ,Y.Sankarasubramaniam, E.Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, Volume 38, No 4, pages 393-422, 2002.
- [I.kang and R.Poovendran, 2003] I.kang and R.Poovendran. Maximizing static network lifetime of wireless broadcast adhoc networks. In *Proceeding of IEEE International Conference on Communications.(ICC'03)*, Volume 3, pages 2256 – 2261, ISBN: 0-7803-7802-4, 2003.
- [Ian F et al., 2007] Ian F. Akyildiz, Tommaso Melodia, and Kaushik R. Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. In *Computer Networks*, Volume 51, No 4, 2007.
- [Ilya R et al., 2007] Ilya R. Fischhoff, Siva R. Sundaresan, Justine Cordingley, D. I. Rubenstein.2007. Habitat use and movements of plains zebra (*Equus burchelli*) in response to predation danger from lions. *Behavioral Ecology*, Volume 18, issue 4, pages 725-729, ISSN: 1045-2249, 2007.
- [Ismail M, 2013] Ismail MANSOUR. Contribution à la sécurité des communications des réseaux de capteurs sans fil. Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL – CLERMONT II, Soutenue publiquement le 5 juillet 2013.
- [J. Capkun et al., 2003] J. Capkun, J. Hubaux, L. Butty. Mobility helps security in ad hoc networks. In *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, New York, NY, USA, pages 46–56, 2003.
- [J. Li et al., 2007] J. Li, P. Mohapatra. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks. *Journal Pervasive and Mobile Computing*, Volume 3, No 3, pages 233–254, 2007

[J. Rezazadeh et al.,2011] J. Rezazadeh, M. Moradi, A. S. Ismail. Efficient localization via Middle node cooperation in wireless sensor networks. In proceedings of international Conference on Electrical, Control and Computer Engineering (INECCE, 2011), pages. 410-415, ISBN: 978-1-61284-229-5, 2011.

[J. Tian et al.,2002] J. Tian, J. Hahner, C. Becker, I. Stepanov, K. Roth ermel. Graph-based Mobility Model for Mobile Ad Hoc Network Simulation. In the Proceedings of 35th Annual Simulation Symposium, in cooperation with the IEEE Computer Society and ACM, San Diego, California, pages 337 – 344, ISSN: 1082-241X, 2002.

[J.Chang and L.Tassiulas, 2000] J.Chang and L.Tassiulas. Energy conserving routing in wirless ad hoc network. In proceedings of .IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), Volume .1, pages.22-31, 2000.

[J.P. Ebert, 2000] J.P. Ebert, B. Stremmel, E. Wiederhold and A. Wolisz. An EnergyEfficient Power Control Approach for WLANs. Journal of Communications and Networks (JCN), Volume.2, No.3 , pages 197-206, 2000.

[Jang et al., 2009] Jang- Ping Shen, Kun-Ying Hsieh and Yao-Kun Cheng. Distributed Transmission Power Control Algorithm for Wireless Sensor Networks. INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING, pages. 1447-1463, 2009.

[Jason H et al., 2000] Jason Hill, Robert Szewczyk, Alec Woo, Seth Hollar, David E. Culler, and Kristofer S. J. Pister. System architecture directions for networked sensors. In Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, Volume 34, pages 93–104. ACM press, 2000.

[Javad et al., 2012] Javad Rezazadeh, Marjan Moradi, Abdul Samad Ismail. Mobile Wireless Sensor Networks Overview. IJCCN International Journal of Computer Communications and Networks , Volume 2, Issue 1, pages 17-22, February 2012.

[JeongGil K and A.T,2010] JeongGil Ko, Andreas Terzis. Power Control for Mobile Sensor Networks: An Experimental Approach. In Proceedings of IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communication and Networks, pages 1 – 9, ISBN: 978-1-4244-7150-8, 2010.

[Jin Wang et al., 2012] Jin Wang, Xiaoqin Yang, Jianwei Zhang, Yunjie Chen and Jeong-Uk Kim. Power Assignment Method for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, Volume 5, No 2, June 2012.

[Joanna Kulik et al., 1999] Joanna Kulik, Wendi Rabiner, Hari Balakrishnan. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks. In *Proceeding of 5th ACM/IEEE Mobicom Conference*, Seattle, WA, August, Pages 174-185, ISBN:1-58113-142-9, 1999.

[K. Dantu et al., 2005] K. Dantu, M. Rahimi, H. Shah, S. Babel, A. Dhariwal, G. S. Sukhatme. Robomote: enabling mobility in sensor networks. In *The Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Pages 404 – 409, 2005.

[K. Flautner et al., 2000] K. Flautner, R. Uhlig, S. Reinhardt and T. Mudge. Thread-level parallelism and interactive performance of desktop applications. In *Proceeding of Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-IX)*, pages 129-138, November 2000.

[K. Srinivasan and P.L, 2006] K. Srinivasan and P. Levis. RSSI is under Appreciated. In *Third Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2006)*, Cambridge, Massachusetts, May 2006.

[K.Hellman and M.C, 2006] Keith Hellman and Michael Cologrosso. Investigating a Wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies. *Journal of interconnection Networks*, Volume 7, No 1, pages 91-99, 2006.

[K.Holger and A.W, 2005] K.Holger and Andreas Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*, ISBN: 978-0-470-09510-2, Wiley, 2005.

[KAHN P et al., 2010] KAHN Patrice, PERSON-SILHOL Dominique et VASSEUR Dominique. *Anticipation, innovation, perception : Des défis pour la maîtrise des risques à l'horizon 2020*. Editeur : Paris : Ed.TECHNIQUE & DOCUMENTATION, Edition SRD, lavoisier, pages 64-67, ISBN : 978-2-7430-1295-3, septembre 2010

[Kim et al., 2008] Kim, J., S. Chang and Y. Kwon. ODTPC: On demand transmission power control for wireless sensor networks. In *Proceeding of International Conference on Information Networking*, pp. 1-5, ISSN: 1976-7684, 2008.

[Krisztián Flautner et al., 2002] Krisztián Flautner, Steve Reinhardt, Trevor Mudge. Automatic performance setting for dynamic voltage scaling. *Journal of Wireless Networks*, Kluwer Academic Publishers Hingham, MA, USA, Volume 8, Issue 5, pages 507 – 520, September 2002.

[Kubisch et al., 2003] Kubisch, M. Karl, H. Wolisz, A. Zhong, L.C. Rabaey, J. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks. In proceeding of *Wireless Communications and Networking (WCNC IEEE)*, pages 558 – 563, ISSN: 1525-3511, 2003.

[L. Fang, 2005] L. Fang, P.J. Antsaklis, L. Montestruque, M.B. McMickell, M. Lemmon, Y. Sun, H. Fang, I. Koutroulis, M. Haenggi, M. Xie, X. Xie. Design of a wireless assisted pedestrian dead reckoning system – the NavMote experience. In *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Volume 54, No 6, pages 2342–2358, ISSN: 0018-9456, 2005.

[LEHSAINI M, 2009] LEHSAINI Mohamed. Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique. Thèse de Doctorat, 2009.

[Lindsey et al., 2002] Lindsey, S., Raghavendra, C.S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. In *proceedings of IEEE Aerospace Conference*, Volume 3, pages 1125 -1130, 2002.

[M. Chatterjee et al., 2002] M. Chatterjee, S. K. Das, and D. Turgut. WCA. A weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks. *Journal of Cluster Computing (Special Issue on Mobile Ad hoc Networks)*, Volume 5, No 2, pages 193-204, 2002

[M. Haenggi and D. Puccinelli, 2005] Martin Haenggi and Daniele Puccinelli. Routing in Ad Hoc Networks: A Case for Long Hops. *IEEE Communications Magazine*, Volume:43, Issue: 10, pages 93 – 101, 2005.

[M. Ilyas and I. M, 2005] M. Ilyas and I. Mahgoub. *Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems*, ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.

[M. Masdari and M.Tanabi, 2013] Mohammad Masdari and Maryam Tanabi. (2013). Multipath Routing protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey and Analysis. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, Volume 6, No 6, pages 181-192, 2013.

- [M. Ramakrishnan and P. V, 2009] M. Ramakrishnan and P. Vanaja Ranjan. Optimal Power Control with Overhearing Avoidance for Wireless Sensor Networks. *Journal of Computer Science*, Volume 5, Issue 4, pages 297-301, 2009.
- [Maarten D and F.H, 2006] Maarten Ditzel and Frans H. Elferink. Low-power radar for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd European Radar Conference (EuRAD'06)*, Manchester, UK, pages 139-141, 2006.
- [Ning et al., 2004] Ning. Xu; Sumit. Rangwala; Krishna Kant. Chintalapudi; Deepak Ganesan; Alan. Broad; Ramesh Govindan; Deborah Estrin. A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '04)*, New York, NY, USA, ACM, pages 13-24, 2004.
- [O. K. Tonguz and G. Ferrari, 2006] O. K. Tonguz and G. Ferrari. *Ad hoc Wireless Networks – A Communication Theoretic perspective*. WILEY Edition, ISBN: 13 978-0-470-09110-4, 2006.
- [Ozan K et al., 2006] Ozan K. Tonguz and Gianluigi Ferrari. *AD DOC WIRELESS NETWORKS*. ISBN 0-470-09110-X 0, WILEY EDITION, 2006.
- [P. Juang et al., 2002] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Martonosi, L. Peh, D. Rubenstein. 2002. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with Zebrant. In *Proceedings of Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS)*, Pages 96-107, 2002.
- [P. Johansson et al., 1999] P. Johansson, T. Larsson, N. Hedman, B. Mielczarek, and M. Degermark. Scenario based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks. In *International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, , pp. 195—206, 1999.
- [P. Johnson and D.C,1996] P. Johnson and D.C Andrews. Remote continuous monitoring in the home. *Journal of Telemedicine and Telecare*, Volume.2, No.2, pages 107-113, June 1996.
- [Pierre Bremaud, 2008] Pierre Bremaud. *Markov Chains*. ISBN-13: 978-0387985091, Springer; Corrected edition, March 1, 2008.
- [Qinghua.W and I. B, 2010] Qinghua Wang et Ilangko Balasingham. *Wireless Sensor Networks - An Introduction*, Chapter 1 in *Wireless Sensor Networks: Application-centric*

Design, book edited by Geoff V Merreh and Yen Kheng Tan (Ed.) ISBN: 978-953-307-321-7, In Tech, 2010.

[R. Kravets and P. K, 2000] R. Kravets and P. Krishnan. Application-driven Power Management for Mobile Communication. In *Wireless Networks*, Volume 6, No 4, pages 263–277, 2000.

[R. Ramanathan and R.R, 2000] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain, “Topology Control of Multihop Wireless Networks Using Transmit Power Adjustment. In proceedings of IEEE INFOCOM, vol. 2, pp. 404-413, 2000.

[R. Shah et al., 2003] R. Shah, S. Roy, S. Jain., W. Brunette. Data mules: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, pages 30 – 41, 2003.

[R. Zheng et al, 2003] R. Zheng, J. Hou, L. Sha. Asynchronous wakeup for ad hoc networks, In *Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, Annapolis, USA, pages 35–45, 2003.

[Rabah Meraihi, 2005] Rabah Meraihi. Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2005.

[S. Kumar et al., 2002] S. Kumar, D. Shepherd, and F. Zhao. Collaborative signal and information Processing in micro-sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, Volume:19 , Issue: 2, pages 13 – 14, March 2002.

[S. Gandham et al.,2003] S. Gandham, M. Dawande, R. Prakash, S. Venkatesan. Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2003

[S. Kumar and D. S, 2001] S. Kumar and D. Shepherd. SensIT: Sensor information technology for the warfighter. In *Proceedings of the. 4th International Conference on Information Fusion*, pages 1-6, 2001.

[S. Lin et al., 2006] S. Lin, J. Zhang, G. Zhou, L. Gu, T. He and J.A. Stankovic. ATPC: Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks. In the proceeding of 4th

international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys'06), Boulder, Colorado, pages 223-236, November 2006.

[S. S. Dhillon and K. Chakrabarty,2003] S. S. Dhillon and K. Chakrabart. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks. In proceeding of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pages 1609–1614, 2003.

[S. Saro and W. B, 2009] S. Saro and W. B. Heinzelman. Cluster head election techniques for coverage preservation in wireless sensor networks. in Ad Hoc Networks, Volume 7, Issue 5 , pages 955-972, 2009

[S.A. Munir, 2007] S.A. Munir, B. Ren, W. Jiao, B. Wang, D. Xie, J. Ma. Mobile wireless sensor network: Architecture and enabling technologies for ubiquitous computing. In International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, Volume 2, pages 113–120 , 2007.

[Shafinaz et al., 2007] Shafinaz Buruhanudeen, Mohamed Othman, Mazliza Othman, and Borhanuddin Mohd Ali. Mobility models, broadcasting methods and factors contributing towards the efficiency of the MANET routing protocols: Overview. In IEEE International Conference Telecommunications and Malaysia (ICT-MICC 2007) , pages 226–230, May 2007

[Shah B et al., 2005] Shah Bhatti, James Carlson, Hui Dai, Jing Deng, Jeff Rose, Anmol Sheth, Brian Shucker, Charles Gruenwald, Adam Torgerson, Richard Han. MANTIS OS: An Embedded Multithreaded Operating System for Wireless Micro Sensor Platforms. Journal Mobile Networks and Applications, Special Issue on Wireless Sensor Networks, Volume 10 Issue 4, pages 563-579, 2005.

[Shio K. S et al, 2011] Shio Kumar Singh et al. Applications, classifications and Selections of Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. International Journal of advanced engineering sciences and technologies (IJAEST), Volume 1, Issue 2, pages 85-95, 2011.

[T. Camp et al., 2002] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. In Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC):

Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, Volume 2, No 5, pages 483-502, 2002.

[T.A. ElBatt,2000] T.A. ElBatt, S. V. Krishnamurthy, D. Connors and S. Dao. Power Management for Throughput Enhancement in Wireless Ad hoc Networks. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), New Orleans, LA, pages 1506 – 1513, June 2000.

[Tijds V. D, K. L, 2003] Tijds van Dam, Koen Langendoen. An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, Pages 171 – 180, 2003.

[Trevor A, 2005] Trevor Armstrong. wakeup based power management in multi-hop wireless networks. Term survey paper, university of Toronto. Available at <http://www.eecg.toronto.edu/trevor/Wakeup/index.html>, 2005.

[Vamsi Paruchuri et al., 2004] Vamsi Paruchuri, Shivakumar Basavaraju, Arjan Duresi, Rajgopal Kannan and S.S. Iyengar. Random Asynchronous Wakeup Protocol for Sensor Networks. In Proceedings of the First International Conference on Broadband Networks, pages 710 – 717, 2004.

[VASANTHI.V et al., 2011] VASANTHI.V, Romen Kumar.M, Ajith Singh.N and M.Hemalatha. A Detailed Study of Mobility Models in wireless sensor networks. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Volume 33, No 1, pages 7-14, 2011.

[Vijay R et al., 2006] Vijay Raghunathan, Saurabh Ganeriwal, and Mani Srivastava. Emerging techniques for long lived wireless sensor networks. In IEEE Communications Magazine, Volume 44, No 4, pages 108-114, 2006.

[W. Heinzelman et al., 2000] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000

[W. Ye et al., 2004] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin. Medium access with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. IEEE/ ACM Transactions on Networking, Volume 12, No 3, pages 493–506, 2004

[Wei Li et al., 2006] Wei Li, Christos G. Cassandras, and Michael Clune. Model-Based Design of a Dynamic Voltage Scaling Controller Based on Online Gradient Estimation Using SimEvents. In Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA, 2006.

[X. Jia et al., 2004] X. Jia, D. Li, and D. Du. QoS topology control in ad hoc wireless networks. In the proceedings of Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM'04), Hong Kong, pages 1264 – 1272, 2004.

[X.M. Zhang et al., 2009] X.M. Zhang, Q. Liu, S.F. Dai, and Y.Z. Liu. Traffic Load Based Interference-Aware Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks, (in Chinese with English abstract). Journal of Software, Volume 20, pages 2721-2728, 2009.

[Xue Y and H.V, 2004] Xue Yang Nitin H.Vaidya. A Wakeup Scheme for Sensor Networks: Achieving Balance between Energy Saving and End-to-end Delay. In Proceedings of IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2004), pages 19–26, 2004.

[Y. Zhu and F. M, 2004] Y. Zhu and F. Mueller. Feedback EDF Scheduling Exploiting Dynamic Voltage Scaling. In Proceedings of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, pages 84 – 93, 2004.

[Ya Xu et al., 2001] Ya Xu, John Heidemann, Deborah Estrin. Geography-informed energy conservation for Ad Hoc routing. Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking, New York, NY, USA, ACM, pages 70-84, 2001.

[Yacine Y, 2012] yacine younes. Minimisation d'énergie dans un réseau de capteur. mémoire de magister, université mouloud mammeri de tizi ousou, soutenu le 26 /09/2012.

[Yingyue and H.Q, 2004] Yingyue Xu and Hairong Qi. Distributed Computing Paradigms for Collaborative Signal and Information Processing in Sensor Networks. Journal of Parallel and Distributed Computing, Volume 64 Issue 8, pages 945 – 959, 2004.

[Yves B and Aude-E. F, 2007] Yves Bélanger et Aude-Emmanuelle Fleurant. Les munitions intelligentes, changement de paradigme. Article publié sur le site GRIMS, valable au : <http://www.grims.uqam.ca/spip.php?article29>, 2007

[ZHANG et al., 2010] ZHANG Shu-Kui, CUI Zhi-Ming, GONG Sheng-Rong, LIU Quan, FAN Jian-Xi. A Data Aggregation Algorithm Based on Splay Tree for Wireless Sensor Networks. Journal of Computers , Volume 5, No 4, 2010.

Webographie

- [1] SensorScope valable au <http://lcav.epfl.ch/sensorscope-en>, Date d'accès : 2014.
- [2] Sismique-Roumanie et Bulgarie, valable au <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/73379.htm>. Date d'accès : 2014
- [3] Sismique – UJF – Bruit sismique
<http://www.ujf-grenoble.fr/universite/medias-etcommunication/actualites/le-bruit-sismique-utilisepour-la-premiere-fois-pour-imager-des-structuresprofondes-du-manteau-terrestre-333548.htm>., Date d'accès 2014.
- [4] Sismique – Ecoulements sous-glaciaires
http://www.gipsa-lab.grenobleinp.fr/recherche/projets.php?id_projet=189, Date d'accès : 2014
- [5] <http://www.iso.org>. ISO (International Standardization Organization), Date d'accès 2014
- [6] ZigBee Standards Organization, "ZigBee Specifications", Document 053474r17, ZigBee Standards Organization, Janvier 2008.
- [7] Bluetooth SIG, "Specification of the Bluetooth system, Core, Version 1.1", Bluetooth SIG Homepage: www.Bluetooth.com.
- [8] Crossbow Technology Inc. MICAz ZigBee Series (MPR2400); Available online: http://www.willow.co.uk/html/mpr2400-_micaz_zigbee.html (accessed on 29 April 2011).
- [9] Moteiv, Inc. TmoteSky; Available online: <http://sentilla.com/files/pdf/eol/tmote-sky-datasheet.pdf> (accessed on 29 April 2011).
- [10] National Semiconductor Corporation, LMX3162 Single Chip Radio Transceiver, Evaluation Notes and Datasheet, 2000.

- [11] Telit, "Telit," <http://www.telit.com/>. Date d'accès : 2014.
- [12] Crossbow. Mica and mica2 wireless measurement system datasheets, 2003.
- [13] "Data Sheet – CC1000 Single Chip Very Low Power RF Transceiver," http://www.chipcon.com/files/CC1000_Data_Sheet_2_3.pdf.
- [14] "Data Sheet – TR1000 916.50 MHz Transceiver 6.5 * 10 mm Package," <http://www.rfm.com/products/data/tr1000.pdf>.
- [15] "Data Sheet – 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / Zigbee-Ready RF Transceiver," http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_Sheet_1_4.pdf
- [16] "EM2420 – 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / Zigbee RF Transceiver," <http://www.ember.com/pdf/EM2420datasheet.pdf>.
- [17] Simulateur WSNNet, <http://wsnet.gforge.inria.fr/>, Date d'accès : 2008

Liste des communications

Revue internationale avec comité de lecture

- A. Bendjeddou, F. Djemil Tolba, N. Ghoualmi, P. Lorenz, "DISTRIBUTED SCHEME FOR TRANSMISSION POWER CONTROL IN MOBILE WIRELESS SENSOR NETWORKS", The Mediterranean Journal of Computers and Networks, Volume 8, No. 2, April 2012 , pp 42-48, ISSN: 1744-2397.
- Amira Bendjeddou, Nacira Ghoualmi, "Probabilistic Methods based on Energy's Threshold in Switching Mode of Mobile Wireless Sensor for Surveillance Application", International Journal of Computer Applications, Volume 48 - Number 11, pp 40-47, 2012.
- Amira Bendjeddou, Nacira Ghoualmi, Congduc Pham, "A new method for prolonging network lifetime and maintaining the connectivity in wireless sensor network through controlling the transmission power", International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS), volume 5, no 1, pages 1-14, ISSN: 1947-3176, 2014

Conférence internationale avec comité de lecture

- A. Bendjeddou, F. Djemili Tolba, N. Ghoualmi and P. Lorenz. 2011. DPCS: A Distributed Power Control Scheme for Mobile Wireless Sensor Networks. In proceedings of The Fourth IEEE International Symposium on Innovation in Information & Communication Technology, Amman, Jordan, ISBN :978-1-61284-672-9, 30 – 34.

Séminaire national

- Amira Bendjeddou, Nacira Ghoualmi, « Bio inspired model for mobile sensor based varying energy's threshold. Les 2eme journées doctoral en informatique (JDI'2012)-Guelma. 18-19 Novembre 2012.