

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Centre de Recherches Mathématiques et Applications de
Rabat (CEREMAR)

Structure de Recherche : LabMIA-SI

Discipline : Mathématiques, Informatique et Applications - Sécurité de
l'Information

Spécialité : Mathématiques Appliquées

Présentée et soutenue le 11/06/2021 par :

Souad EHLALI

**Contribution aux solutions de routage pour l'économie et
l'optimisation de la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs
sans fil**

JURY

<i>Souad EL BERNOUSSI</i>	<i>PES</i>	<i>Université Mohammed V-Rabat Faculté des Sciences</i>	<i>Président</i>
<i>Awatef SAYAH</i>	<i>PES</i>	<i>Université Mohammed V-Rabat Faculté des Sciences</i>	<i>Directeur de Thèse</i>
<i>Noha EL KHATTABI</i>	<i>PES</i>	<i>Université Mohammed V-Rabat Faculté des Sciences</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>
<i>Imade BENSAOUD</i>	<i>PES</i>	<i>Université Mohammed V-Rabat Faculté des Sciences</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>
<i>Youssef BENTALEB</i>	<i>PH</i>	<i>Université Ibn Tofail-Kénitra Ecole Nationale des Sciences Appliquées</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>

Année Universitaire : 2020-2021

N° d'ordre : 3473

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Centre de Recherches Mathématiques et Applications de
Rabat (CEREMAR)

Structure de Recherche : LabMIA-SI

Discipline : Mathématiques, Informatique et Applications - Sécurité de
l'Information

Spécialité : Mathématiques Appliquées

Présentée et soutenue le 11/06/2021 par :

Souad EHLALI

**Contribution aux solutions de routage pour l'économie et
l'optimisation de la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs
sans fil**

JURY

<i>Souad EL BERNOUSSI</i>	<i>PES</i>	<i>Université Mohammed V-Rabat Faculté des Sciences</i>	<i>Président</i>
<i>Awatef SAYAH</i>	<i>PES</i>	<i>Université Mohammed V-Rabat Faculté des Sciences</i>	<i>Directeur de Thèse</i>
<i>Noha EL KHATTABI</i>	<i>PES</i>	<i>Université Mohammed V-Rabat Faculté des Sciences</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>
<i>Imade BENSAOUD</i>	<i>PES</i>	<i>Université Mohammed V-Rabat Faculté des Sciences</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>
<i>Youssef BENTALEB</i>	<i>PH</i>	<i>Université Ibn Tofail-Kénitra Ecole Nationale des Sciences Appliquées</i>	<i>Rapporteur/Examineur</i>

Année Universitaire : 2020-2021



AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été effectués au Laboratoire de Mathématiques, Informatique et Applications - Sécurité de l'Information. (LabMIA-SI) sous la Direction de Madame Awatef SAYAH, PES à la Faculté des Sciences de Rabat

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à Madame Awatef SAYAH ma Directrice de thèse, PES à la Faculté des Sciences de Rabat d'avoir accepté de diriger mes travaux de recherches et de m'avoir encouragé et beaucoup soutenu tout au long de mes années de thèse. Je la remercie pour sa présence scientifique, sa disponibilité, ses conseils, ses orientations pédagogiques et la confiance qu'elle m'a accordée ce qui a été d'une grande utilité pour la réussite de mon travail de thèse. J'aimerais encore la remercier, elle m'a permis de surmonter les difficultés rencontrées, elle fut d'une aide précieuse tout au long de l'évolution du travail de ma thèse. Sans qui, ce projet de vie appelé Doctorat n'aurait jamais été accompli.

Je tiens à remercier vivement Madame Souad EL BERNOUSSI, PES à la Faculté des Sciences de Rabat de m'avoir accueilli et accepté que mon travail de recherche puisse s'effectuer au sein du Laboratoire LabMIA-SI ce qui m'a offert l'occasion d'intégrer l'équipe des étudiants chercheurs de ce Laboratoire. Je lui exprime ma profonde gratitude, pour sa rigueur et son aide et aussi, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ma soutenance de thèse.

Je tiens également, à remercier infiniment Madame Noha EL KHATTABI, PES à la Faculté des Sciences de Rabat pour sa disponibilité, son aide, sa rigueur ainsi que le partage en permanence de son expertise. Aussi, pour avoir accepté de rapporter et d'examiner ma thèse en participant à l'évaluation de mon travail de recherche et d'être également membre du jury final.

Je veux exprimer ma reconnaissance et remerciements à Monsieur Imade BENSAOUD, PES à la Faculté des Sciences de Rabat d'avoir accepté de rapporter et d'examiner cette thèse. Aussi, pour m'avoir accordé une grande confiance, par ses judicieux et nombreux conseils et suggestions qui m'ont été de grandes valeurs, en me permettant de mener ce travail avec épanouissement et motivation. Également, pour sa participation au jury de ma soutenance de thèse de doctorat.

Je remercie avec une profonde gratitude Monsieur Youssef BENTALEB PH à l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de l'Université Ibn Tofail de Kénitra, pour ses conseils, sa modestie, son optimisme et l'intérêt qu'il a porté à mon travail. Son aide et ses encouragements incessants m'ont motivé et soutenu pour avancer avec sérénité dans mon travail et assurer mes missions convenablement. Je le remercie aussi de bien vouloir rapporter et examiner la qualité de mon travail et de participer au jury final.

Je tiens également, à réitérer mes sincères remerciements aux professeurs membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Je tiens à adresser mon hommage et mes sincères remerciements à tous(tes) mes professeurs(es) des anciens(nes) au plus récents(es) pour leurs enseignements, encadrements pédagogiques, leur transfert de savoir et tout ce qu'ils/elles m'ont fait apprendre tout au long de mes études. Merci infiniment chers(es) Professeurs(es).

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements de reconnaissance à mes parents que je ne saurais jamais remercier assez pour toute leur présence, qui me comble. Leur appui dans l'entreprise de mes travaux de recherches avec plein de sacrifices et de patience sans limites. Je vous remercie pour m'avoir conseillé, soutenu dans mes études et encouragé dans les moments les plus difficiles de ma vie.

Également, je remercie de tout cœur mes frères, ma sœur et ma belle-sœur pour tous leurs soutiens constants, encouragements et la confiance inconditionnels qu'ils m'ont toujours accordé pour accomplir mon travail de recherche. Ils ont su me soutenir et m'accompagner lors de mes travaux de recherche et pendant la rédaction de ce rapport de thèse.

Mes pensées vont particulièrement à mes adorables chères nièces, votre joie, votre gaieté et votre amour me comblent de tendresse, vous êtes ma lueur du bonheur.

Je remercie ma sœur de cœur Dr Laila LAALOU qui inlassablement et à sa façon, a toujours trouvé -durant toutes ces années-, les meilleurs mots d'encouragement et le bienveillant support permettant d'augmenter ma motivation et ma persévérance. J'en serai toujours reconnaissante.

Mes profondes et chaleureuses pensées à tous(tes) mes amis(es) que je remercie pour m'avoir soutenu pendant tout ce temps. Ils ont également une part importante dans la réalisation de cette thèse.

Finalement, je remercie toutes ma famille et les personnes qui ont contribué du prêt ou de loin à l'élaboration du présent travail et qui m'ont été d'un grand support et soutien incontournables.



RESUME

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) constituent une technologie potentiellement évolutive et ubiquitaire. C'est un système de communication sans fil constitué de minuscules nœuds capteurs capables d'acquérir des informations sur leur environnement. Ils suscitent beaucoup d'intérêt et leur rôle est décrit tel d'un middleware (Intergiciel) entre l'environnement à superviser et l'utilisateur. Quand ces nœuds sont déployés ils doivent rester opérationnels tout en préservant une durée de vie maximale du réseau. Notre thèse s'inscrit donc dans la démarche de l'efficacité énergétique, à travers des contributions aux solutions de routage pour l'optimisation de la gestion de l'énergie dans ces réseaux. Nous avons proposé dans une première approche prédictive, l'algorithme de routage CTEB qui repose sur celui du protocole LEACH et qui sera basé sur la génération d'une matrice de prédiction pour la répartition de l'énergie de chaque nœud dans le réseau, en vue d'un ordonnancement optimal et prévisionnel de l'activité des nœuds. Puis dans une seconde approche nous avons développé un algorithme de routage ELMDGT qui est une version améliorée de la version originale de PEGASIS et qui adopte la formation de la chaîne de nœuds la plus courte dans le réseau avant l'exécution du protocole de routage.

Mots clés : Réseaux de Capteurs Sans Fil, Efficacité énergétique, Durée de vie, Protocole de Routage, Clustering, LEACH, PEGASIS



ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (RCSF) are a potentially scalable and ubiquitous technology. It is a wireless communication system made up of tiny sensor nodes capable of acquiring information about their surroundings. They arouse a lot of interest and their role is described as middleware between the environment to be monitored and the user. When these nodes are deployed they must remain operational while preserving maximum network lifespan. Our thesis is therefore part of the energy efficiency approach, through contributions to routing solutions for the optimization of energy management in these networks. In a first predictive approach, we have proposed the CTEB routing algorithm which is based on that of the LEACH protocol and which will be based on the generation of a prediction matrix for the distribution of the energy of each node in the network, in view of an optimal and predictive scheduling of node activity. Then in a second approach we developed an ELMDGT routing algorithm which is an improved version of the original version of PEGASIS and which adopts the formation of the shortest chain of nodes in the network before the execution of the routing protocol.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Energy Efficiency, Lifetime, Routing protocols, Clustering, LEACH, PEGASIS



TABLE DE MATIERES

AVANT-PROPOS

RESUME

ABSTRACT

TABLE DE MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ALGORITHMES

ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE

BACKGROUND SUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL	1
Contexte et objectifs.....	1
Problématique et Motivation.....	2
Contributions.....	4
Organisation de la thèse	5

Chapitre I :

RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL :

ETAT DE L'ART TECHNOLOGIES ET PROBLEMATIQUES

I.1. Introduction	7
I.2. Réseaux de capteurs sans fil : Emergence et concept	8
I.3. Réseaux de capteurs sans fil : Etat de l'art et problématiques.....	9
I.3.1. Le protocole de routage Cluster based Multipath Routing Protocol (CMRP).....	11

I.3.2. Le protocole Energy-Efficient LEACH (EE-LEACH).....	11
I.3.3. Le protocole Routing Algorithm using the Ring-Zone (RARZ).....	12
I.3.4. Le protocole Hierarchical Energy Efficient Clustering Algorithm (HEEC).....	12
I.4. Architecture matérielle des nœuds capteurs sans fil	13
I.5. Architecture du réseau de capteurs sans fil	18
I.6. Modèles de trafic de données	19
I.7. Modèle de la gestion des communications : Rôle et Découpage de la consommation énergétique	23
I.8. Paramètres et spécificités influençant la conception et le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fil	29
I.8.1. Caractéristiques paramétriques des réseaux de capteurs sans fil	29
I.8.2. Stratégie du déploiement des nœuds de capteurs sans fil	31
I.8.3. Réseaux de Capteurs Sans Fil et MANET	32
I.9. Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil	34
I.10. Conclusion	37

Chapitre II :

MODELE DE CONSOMMATION D'ENERGIE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

II.1. Introduction.	39
II.2. Médias de transmission : Modèles de propagation radiofréquence	39
II.3. Aspects consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil	42
II.3.1. Energie d'acquisition	43
II.3.2. Energie de traitement	43
II.3.3. Energie de transmission	43
II.4. Modèle de la consommation d'énergie	46
II.5. Techniques de conservation d'énergie	50
II.6. Conclusion	53

Chapitre III :

LES PROTOCOLES DE ROUTAGE ET LA DUREE DE VIE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

III.1. Introduction	55
III.2. La durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil	56
III.3. Routage et optimisation de la consommation énergétique	57

III.4. Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil	61
III.5. Classification par type du protocole	63
III.5.1. Protocoles de routage multi-chemins	64
III.5.1.1- Flooding	64
III.5.1.2 Gossiping	65
III.5.2. Protocoles de routages basés sur la négociation des données	66
III.5.3. Protocoles de routage basés sur les interrogations	67
III.5.4. Protocoles de routage basés sur la QoS	68
III.6. Classification par la structure du réseau	69
III.6.1. Protocoles de routage plats (Flat Based-Routing)	69
III.6.2. Protocoles de Routage Hiérarchiques	70
III.6.3. Protocoles de routage basés sur la localisation	71
III.6. Conclusion	74

Chapitre IV :

ALGORITHME DE CLUSTERING POUR L'EQUILIBRAGE DES CHARGES ÉNERGETIQUES "CTEB"

IV.1. Introduction.....	76
IV.2. Compromis dans la gestion des réseaux de capteurs sans fil : la couverture et la connectivité, l'énergie et le trafic de données	77
IV.2.1. Agrégation des données	78
IV.2.2. Le concept de clustering.....	80
IV.3. Protocole de routage LEACH.....	82
IV.4. Technique de fonctionnement du protocole LEACH	84
IV.5. Motivation de la contribution	87
IV.6. Principe de la technique "A Clustering Technique based on Energy Balancing Algorithm for Routing In Wireless Sensor Networks" (CTEB)	88
IV.7. Simulation et résultats	95
IV.7.1. Evaluation de la durée de vie du réseau selon les protocoles CTEB et LEACH	96
IV.7.2. Evaluation de la durée de vie du réseau en fonction de l'énergie initiale des nœuds	97
IV.7.3. Durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds du réseau	98
IV.8. Conclusion	99

Chapitre V :**TECHNIQUE DE COLLECTE EFFICACE DE DONNEES POUR LA
MAXIMISATION DE LA DUREE DE VIE “ELMDG”**

V.1. Introduction	101
V.2. Le routage hiérarchique à base de structure en chaîne, Algorithme glouton ..	102
V.3. Protocole de routage PEGASIS	104
V.4. Principe de fonctionnement du protocole PEGASIS	106
V.5. Motivation de la contribution	109
V.6. Principe de la technique ELMDG “Efficient Lifetime Maximization Data Gathering technique for routing in wireless sensor networks”	110
V.6.1. Considérations de la problématique	111
V.6.2. Le concept de la contribution	112
V.7. Simulation et résultats	116
V.7.1. Nombre nœuds et la durée de vie du réseau	117
V.7.2. La localisation de la station de base et la durée de vie du réseau ...	118
V.7.3. L'évolution de la durée de vie en fonction de l'énergie initiale des nœuds	119
V.8. Conclusion	120
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	123
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	127



LISTE DES FIGURES

1.1	Architecture matérielle typique d'un nœud capteur sans fil.....	13
1.2	Synoptique d'un réseau de capteurs sans fil.....	18
1.3	Modèle de trafic de données "Query-Driven".....	20
1.4	Modèle de trafic de données "Time-Driven".....	21
1.5	Modèle de trafic de données "Event-Driven".....	21
1.6	La pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil.....	24
1.7	Classification des Protocoles MAC.....	26
1.8	Exemples de nœuds de capteurs.....	29
1.9	Exemples d'applications WSN -impacts environnementaux, sociétaux et avantages financiers.	35
1.10	Une vue d'ensemble des applications WSN	37
2.1	Courant consommé lors de la transmission d'un message radio sur le nœud MICA2.....	45
2.2	Modèle de la dissipation de l'énergie du module radio d'un nœud de capteur.....	47
2.3	Une vue globale des techniques proposées pour la conservation d'énergie.....	52
3.1	Consommation de l'énergie (deux longueurs de message) en fonction de la portée du signal.....	61
3.2	Taxonomie des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil.....	63
3.3	Classification des protocoles de routage dans les WSN à base de type de protocole	63
3.4	Phénomène de l'implosion.....	64
3.5	Phénomène de chevauchement.....	65
3.6	Taxonomie des protocoles de routage dans les WSN basés sur la structure du réseau.....	69
3.7	Exemple de routage hiérarchique.....	70
3.8	Grille virtuelle - Cas du Protocole "GAF".....	72

3.9	Protocole “GAF” : Diagramme de transition d’état associé à un nœud.....	73
4.1	Topologie hiérarchique du protocole de routage LEACH.....	83
4.2	Evolution de la durée de vie du réseau : comparaison entre le protocole développé CTELB et LEACH.....	96
4.3	Durée de vie du réseau pour différentes énergies initiales jusqu'à la mort du premier nœud.....	98
4.4	Durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds du réseau.....	99
5.1	Structure en chaîne du protocole de PEGASIS.....	105
5.2	Comparaison entre la chaîne transmission selon PEGASIS et la chaîne minimale...	114
5.3	Durée de vie du réseau WSN en fonction du nombre des nœuds.....	118
5.4	Impact de la localisation de la station de base sur la durée de vie du réseau.....	119
5.5	Evolution de la durée de vie du réseau en fonction de l’énergie initiale des nœuds..	120



LISTE DES TABLEAUX

1.1	Evolution des spécifications et performances des microcontrôleurs dans les nœuds des WSN	16
1.2	Comparaison de quelques plates-formes WSN basées sur la vision.....	17
1.3	Réseaux de capteurs et Réseaux Ad-Hoc.....	33
2.1	Comparaison entre différentes technologies sans fil standards	41
2.2	Consommation d'énergie d'un nœud TelosB.....	43
2.3	Caractéristiques électriques des microcontrôleurs les plus utilisés.....	44
2.4	Profil de la consommation d'énergie dans le capteur Telos.....	45
2.5	Paramètres du module radio.....	49
3.1	Classification générale des protocoles de routage (extrait de la littérature)	74
4.1	Valeurs des paramètres de la phase d'initialisation et de simulation.....	95
5.1	La chaine des nœuds de capteurs selon PEGASIS	115
5.2	La chaine des nœuds de capteurs de longueur minimale CLM	115
5.1	Valeurs des paramètres de la phase d'initialisation et de simulation	117



LISTE DES ALGORITHMES

Algorithme 4.1	Phase d'initialisation du protocole CTEB.....	93
Algorithme 4.2	Formation des clusters et transmission dans le protocole CTEB.....	94
Algorithme 5.1	Phase d'initialisation pour la formation de la chaine de longueur minimale	113
Algorithme 5.2	Phase de transmission dans le protocole ELMDG.....	116



ABREVIATIONS

6LowPAN	IPv6 over Low-Power Wireless Area Networks
ACO	Ant Colony Optimization
ADV	Message used by a node to ADVERTISE metadata among neighbor
APTEEN	Adaptive Periodic Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
BS	Base Station (Station de base)
CADR	Constrained Anisotropic Diffusion Routing
CAN	Convertisseur Analogique/Numérique
CCA	Clear Channel Assessment
CCM	Chain-Cluster based Mixed routing
CDMA	Code Division Multiple Access (Accès multiple par répartition en code)
CH	Cluster-Head
CLM	Chaîne de Longueur Minimale
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CMRP	Cluster based Multipath Routing Protocol
CoAP	Constrained Application Protocol
CSIP	Collaborative Signal and Information Processing
CSMA	Carrier Sense Multiple Access (Accès multiple par écoute de porteuse
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (Accès multiple par écoute de porteuse avec évitement de collisions)
CTEB	Clustering Technique based on Energy load Balancing
DD	Directed Diffusion

DSDV	Destination Sequenced Distance Vector Routing
DVS	Dynamic Voltage Scaling
EE-LEACH	Energy-Efficient LEACH
ELMDG	Efficient Lifetime Maximization Data Gathering Technique for Routing in Wireless Sensor Networks
ETT	Expected Transmission Time
ETX	EXpected Transmission Count
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
GPRS	Global Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System : (Système de positionnement par satellites)
GSM	Global System Mobile communications
HEEC	Hierarchical Energy Efficient Clustering Algorithm
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IoE	Internet of Everythings
IoT	Internet of Things
ISO	International Standards Organisation
LC	Leader de la Chaîne
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
LoRa	Long Range
LQI	Link Quality Indicator
MAC	Medium ACcess protocol
MANET	Mobile Ad-hoc NETwork : Réseau mobile ad hoc
MCU	Micro Controller Unit
MECN	Minimum Energy Communication Network
MEMS	Micro-Electro Mechanical Systems
OSI	Open Systems Interconnection
PEGASIS	Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems
QoS	Quality of Service (Qualité de service)
RARZ	Routing Algorithm using the Ring-Zone
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
REQ	Message used to REQuest a data

RF	Radio Frequency (Fréquence radio)
RPL	IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks.
RSSI	Radio Strength Signal Indication
SEP	Stable Election Protocol
SF	Spreading Factor
SMECN	Small Minimum Energy Communication Network
SPEED	Stateless Protocol for End to End Delay
SPIN	Sensor Protocols for Information via Negotiation
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
UDP	User Datagram Protocol
WSN	Wireless Sensors Network



INTRODUCTION GENERALE

BACKGROUND SUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Les prouesses technologiques actuelles ne cessent d'offrir de nouvelles perspectives de développement et d'innovation dans nos quotidiens. L'informatique omniprésente et autonome est devenue une réalité évidente. Ainsi, les nombreux systèmes numériques distribués dans notre environnement physique composent de plus en plus les systèmes d'information ubiquitaires de notre ère.

L'intérêt manifesté pour de nouveaux dispositifs de détection et de surveillance a connu un engouement rapide ces dernières décennies. Grâce, aux avancées conjointes des technologies de l'information et de la communication (ICT), des systèmes microélectroniques et mécaniques (MEMS) et des systèmes embarqués, les Réseaux de Capteurs Sans Fil "RCSF" (ou Wireless Sensors Network "WSN") ont pu alors émerger.

Ces réseaux de capteurs sans fil agissent comme une extension évolutive des réseaux câblés. La capacité du "Sans Fil" réside en fait, dans la modification des usages qui sont désormais tournés vers l'intelligence et la valeur technologique qu'il procure aux applications par rapport aux liaisons câblées.

Contexte et objectifs

Le concept fondamental des WSN étant l'observation et la collecte des données des phénomènes dynamiques et complexes par le biais des nœuds capteurs dont la fonction est orientée vers des tâches autonomes.

Les réseaux de capteurs sans fil permettent en réalité, d'établir une sorte de lien entre le monde réel et le monde virtuel.

Le principe de fonctionnement d'un WSN est communément conçu par quatre systèmes de base, à savoir : un ensemble de nœuds capteurs déployés dans un environnement donné, un réseau d'interconnexion sans fil, une ou plusieurs stations de base dédiée au regroupement des informations collectées et une entité de traitement d'information mise en place soit à la station de base soit au-delà de celle-ci, et qui a pour rôle entre autres l'exploration des données, les requêtes, la gestion des corrélations, etc.

Les nœuds capteurs qui forment un WSN sont de minuscules dispositifs électroniques autonomes, de faibles coûts et puissance. Ils sont alimentés par des petites batteries et dotés de capacité de transmission sans fil de courte portée, habituellement des ondes radios : modules RF (Radio Frequency) pour communiquer entre eux ou directement avec le nœud puit (aussi appelé sink node) ou tout simplement avec une station de base (BS). Du fait, que toutes les données du réseau lui sont transmises par différents chemins, la station de base qui est un point de collecte doit posséder une grande capacité de stockage et de traitement.

Les WSN ont la propriété d'être des structures très adaptatives engendrées par les interactions entre les nœuds suivant les principes d'auto-organisation et d'auto-stabilisation. L'agilité du déploiement, la couverture de très grands espaces géographiques, le fonctionnement autonome (sans intervention humaine) et la grande tolérance aux défaillances sont d'importantes aptitudes et potentialités au niveau des WSN. En effet, vu leurs spécificités très attrayantes, les réseaux de capteurs sans fil ont investi notre quotidien et révolutionner divers domaines d'application tels que la surveillance de l'environnement et des machines, la supervision et la maintenance préventive, la médecine, la santé, le suivi en temps réel des cibles communicantes qui devient plus aisé, la logistique et les transports intelligents, l'habitat et les espaces intelligents, les détections sismiques ou volcaniques et autres.

Problématique et Motivation

Généralement, les WSN sont déployés pour garantir de façon optimale le recensement des informations différentes et réparties dans des environnements déterminés et de supporter aussi, une importante charge de trafic de données générée par les applications mises en place. Ceci, se fait pour de longues durées pouvant atteindre des mois voire plusieurs années, sans pouvoir remplacer les batteries alimentant les nœuds capteurs qui composent ces réseaux.

Les contraintes de miniaturisation font que les nœuds de capteurs dans un WSN soient dotés de ressources très limitées, notamment leurs faibles ressources énergétiques. De ce fait, les performances des WSN sont impactées au niveau de toutes les opérations s'exécutant dans le réseau, que ce soit durant les périodes de transmissions, lors de la collecte des données, le traitement ou le stockage en mémoire.

La préservation de l'énergie des batteries dans les WSN est par conséquent, une contrainte fondamentale et majeure dont dépend extrêmement la durée de fonctionnement du réseau communément appelée durée de vie du réseau. Elle constitue, un défi foncier à relever pour maintenir la puissance et l'autonomie énergétique des réseaux, ce qui justifie l'intérêt des recherches accordées aux problématiques afférentes à l'optimisation de la consommation d'énergie dans ceux-ci.

En effet, la conservation de l'énergie est une obligation absolue et primordiale qui concourt à la longévité opérationnelle des WSN et à l'exploration des performances relatives aux différentes métriques mises en jeu. D'où, l'intérêt mené pour le développement de solutions efficaces visant l'économie globale de l'énergie des nœuds de capteurs, tout en répondant aux besoins des applications. Ceci, doit alors passer par l'adoption d'un ménagement de mode d'utilisation des ressources énergétiques disponibles à travers, un choix judicieux non seulement au niveau des plateformes et solutions matérielles, mais aussi et plus essentiellement, de la manière de fonctionnement du réseau. On rappelle alors quelques techniques proposées pour réduire la consommation d'énergie à savoir : le mode de diffusion des flux de données, les médias de communication qui utilisent des solutions de transmissions de courtes portées (IEEE.802.15.4, BLE, ANT+, Z-Wave,...) ou de longues portées (LoRa, Compatible SIGFOX), les protocoles de routage des données dans le réseau, l'échelle et l'architecture du réseau, etc.

Divers travaux de recherches sur les WSN se sont focalisés dans un premier temps sur l'identification et la caractérisation des opérations les plus consommatrices d'énergie. Puis dans un second temps sur l'optimisation de l'exploitation des ressources énergétiques ce qui permet ainsi, l'amélioration de la durée de vie des WSN.

La littérature scientifique a communément conclu que la plus grande quantité d'énergie est sollicitée pendant l'activité du module radio (notamment la phase de transmission (émission) des données) [1], [2], [9]. Ceci, montre que dans le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fil, le mécanisme le plus important est manifesté durant le routage des données.

De ce fait, puisque, l'économie d'énergie est une performance très pertinente pour prolonger la durée de vie des WSN, le développement d'algorithmes pour l'élaboration des techniques

appropriées et des protocoles de routage efficaces en termes de la préservation de l'énergie se veut très recommandé. Il est donc évident que, tout protocole de routage adopté devra prendre en considération l'assurance de l'efficacité énergétique par la cohabitation de plusieurs paramètres et caractéristiques des WSN telles que : l'équilibrage de la charge énergétique mise en jeu dans les nœuds capteurs, l'énergie initiale des nœuds, la tolérance aux défaillances, la localisation de la station de base, la connectivité dans le réseau, le passage à l'échelle de la couverture qui est souvent très dense, etc.

Contributions

Dans ce même contexte notre travail de thèse a pour intérêt la proposition de solutions protocolaires qui permettent de supporter l'optimisation de la consommation d'énergie lors du routage des flux de données.

Nous nous sommes focalisés dans notre premier travail de recherche à la classe des protocoles hiérarchiques. Desquels, nous nous sommes concentrés sur le protocole LEACH qui est parmi les protocoles les plus étudiés. Ce protocole hiérarchique est orienté division du réseau en clusters distribués (clustering) et sélection des nœuds Cluster-Head (CH) dans ces derniers. Les CHs opèrent alors en tant que relais pour faire communiquer de façon optimisée les données récoltées du réseau vers la station de base. Nous avons par conséquent, voulu que notre intérêt soit particulièrement lié à l'exploitation du concept de clustering. Nous avons donc recherché une technique prédictive qui adopte la notion de la formation des clusters et qui permet d'équilibrer et d'optimiser l'exploitation des charges énergétiques au niveau des nœuds du réseau à travers, le développement d'un algorithme spécifique de routage hiérarchique.

Le concept de la technique que nous avons appelée "A Clustering Technique based on Energy Balancing algorithm for routing in wireless sensor networks" (CTEB) prévoit une répartition au préalable, de l'énergie initiale dans les nœuds. Ainsi, avant que le réseau n'entame son activité, la station de base détermine les profils énergétiques temporels d'activité correspondants aux opérations que pourra effectuer chaque nœud du réseau durant sa vie. C'est une approche centralisée par la station de base dont l'intérêt réside sur le fait que, cette dernière n'a pas de contraintes relatives à ses ressources notamment celles énergétiques. Ce profil énergétique temporel d'activité recherché pour chaque nœud est une représentation de toute ses énergies élémentaires nécessaires aux différentes transmissions ainsi qu'à leurs périodes correspondantes associées. L'approche que nous avons utilisée, c'est une représentation sous forme d'équation matricielle dans laquelle les périodes de transmissions sont les inconnues du

système. La résolution de cette équation a montré que l'adoption de notre technique permet une exploitation raisonnable et optimisée de l'énergie de chacun des nœuds ce qui prolonge par conséquent, la durée de vie du réseau entier. D'où, l'amélioration de la préservation de l'énergie réalisée par notre technique "CTEB".

Aussi, dans notre second travail, nous nous sommes intéressés au protocole de routage PEGASIS qui est aussi de type hiérarchique, mais élaboré autour de la formation d'une chaîne de nœuds de capteurs au lieu des clusters comme dans le cas du protocole LEACH. Ce type de routage évoque des problèmes de garanties de temps de livraison de données, puisque la chaîne formée n'est pas construite sur le besoin d'avoir la chaîne de longueur la plus courte. D'où, le fait de ne pas pouvoir construire une route optimale pour l'acheminement des données dans le réseau. Face à de telles conditions, l'impact est éminemment négatif sur la consommation énergétique.

Nous avons donc conçu notre technique de collecte de données appelé : "Efficient Lifetime Maximization Data Gathering technique for routing in wireless sensor networks" (ELMDG), dont le principe consiste à trouver au départ, la chaîne la plus courte qui va se former en liant à un saut tous les nœuds du réseau entre eux. Ensuite, amorcer les transmissions sur cette chaîne à partir de ses bouts vers le leader de la chaîne qui se chargera de transmettre les données recueillies et agrégées vers la station de base. Notre conception d'un protocole de routage basée sur l'algorithme ELMDG offre une technique pour former la chaîne de longueur la plus minimale qui prend en charge tous les nœuds du réseau. Ce qui a permis une répartition optimisée et équitable de la charge énergétique dans celui-ci, et assurer la prolongation de sa durée de vie sans pour autant avoir des délais supplémentaires de transmissions des données. L'analyse des résultats de nos recherches concluent que les algorithmes des protocoles de routage que nous proposons ont montrés leurs efficacités et sont éprouvés par des simulations et des comparaisons avec des travaux existants.

Organisation de la thèse

Pour répondre à l'objectif d'améliorer la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil, notre mémoire de thèse est organisé comme suit. Dans le premier chapitre on passera en revue l'état de l'art technologique et problématique à travers une synthèse succincte de quelques aspects importants dans les WSN tels que leur concept, les modèles de trafic de données et de communication, les caractéristiques et spécificités, les technologies et applications... avant de

mettre en exergue leurs limitations qui résident principalement dans l'efficacité énergétique des nœuds de capteurs de ces réseaux ce qui impacte directement leur durée de vie.

Puis, dans le second chapitre nous introduisons le modèle de la consommation de l'énergie des batteries pendant les différentes phases de fonctionnements des nœuds des WSN. Notamment, au niveau de la façon de l'utilisation du module radio propre à chaque nœud, parce que la majeure dépense d'énergie des nœuds est enregistrée pendant les communications d'où, l'intérêt apporté aux protocoles de routage.

En plus, puisqu'il n'est pas possible de concevoir une seule et unique solution valide pour tous les problèmes de routage quelles que soient les situations générales ou particulières des réseaux, nous entamerons sur la base d'une revue de la littérature, le troisième chapitre qui portera sur un rappel des différents types de protocoles de routage globalement rencontrés dans les WSN ainsi que, leurs catégorisations.

Ensuite, le quatrième chapitre sera consacré à la description et l'analyse de notre premier travail de recherche. L'évaluation de notre l'algorithme CTEB "A Clustering Technique based on Energy Balancing algorithm for routing in wireless sensor networks" à travers, l'utilisation de métriques différentes est valide de par, son constat relatif à l'optimisation de la consommation d'énergie dans les WSN.

Également, nous poursuivons, dans le cinquième chapitre par aborder notre seconde solution ELMDG "Efficient Lifetime Maximization Data Gathering technique for routing in wireless sensor networks". C'est un algorithme qui s'intéresse au routage hiérarchique en incluant dans son processus une nouvelle stratégie d'ordonnancement et d'exploration du réseau. Les performances de cet algorithme offrent un meilleur compromis entre la durée de vie et la consommation d'énergie des nœuds du réseau.

Enfin, nous achevons ce mémoire de thèse par une conclusion qui résume le bilan déduit à partir de nos approches à travers, les résultats de nos travaux de recherches que nous avons menés ainsi que, des perspectives futures qui pourront être envisagées dans ce sens.

RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL : ETAT DE L'ART TECHNOLOGIES ET PROBLEMATIQUES

I.1. Introduction

L'évolution des technologies conjointement à l'accroissement des besoins et des exigences de la société ont fortement contribué à l'apparition de nouveaux types de réseaux autonomes offrant plus de solutions innovantes et fiables et ayant la spécificité d'être embarquées. Il s'agit de Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) ou Wireless Sensors Network (WSN).

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil constituent une variante évoluée des réseaux classiques sans fil. Ils ne nécessitent pas d'infrastructures fixes et forment une solution très efficace qui répond particulièrement aux problématiques liées à l'accessibilité et la couverture réseau dans les environnements à contexte délicat ou complexe tels que les zones géographiques hostiles et éloignées, les milieux à fort potentiels de danger, ...

Le développement des fonctionnalités des WSN est lié aux avancées réalisées dans quatre domaines clés à savoir : les capteurs/nœuds de capteurs, les dispositifs à semi-conducteurs (systèmes basés sur CMOS), les protocoles de réseau et les technologies de génération/stockage d'énergie [3]. Les progrès et les défis scientifiques et technologiques ont permis alors l'association des " Systèmes Embarqués " et des " Communications Sans Fil " ce qui a rendu l'éventail des nouvelles applications intelligentes quasi-illimitées. Souvent, lorsqu'un capteur appartient à un réseau de capteurs sans fil, les termes capteur et nœuds capteurs sont employés sans différence.

Tout d'abord, dans ce chapitre sera abordé dans sa première partie l'état de l'art technologies et problématiques des WSN. Nous approcherons les principaux concepts des WSN, les architectures des nœuds de capteurs et du réseau, les modèles de trafic et des communications des données ainsi que, le découpage de la consommation énergétique. Puis, dans sa seconde partie nous présentons les caractéristiques, les limitations et contraintes des WSN avant d'entamer un aperçu dévoilant quelques domaines de leurs applications.

I.2. Réseaux de capteurs sans fil : Emergence et concept

Le déploiement en grand nombre de petits nœuds capteurs de faibles puissance et coût est devenu une réalité omniprésente dans nos environnements quotidiens. L'émergence de ces nouveaux systèmes intelligents a pu avoir lieu grâce aux progrès de traitement de signal, des systèmes informatiques, des technologies de communications sans fil [4], [5], [7] et essentiellement des techniques de miniaturisation d'équipements électroniques, ce qui a permis aux nœuds de capteurs d'être embarqués dans des systèmes de plus en plus variés. C'est un enjeu très important pour diverses raisons telles que, celles relatives à une meilleure intégration dans leurs environnements, aux besoins variés des applications, aux contraintes économiques et écologiques.

Un WSN est un réseau formé de nœuds capteurs appelés aussi "motes" qui constituent des microsystemes autonomes déployés dans diverses aires à l'instar des espaces hostiles et des grandes zones géographiques dans le but de prendre en charge leurs environnements [17]. Ils coopèrent ensemble à travers, des détections et des collectes de mesures en temps réel de grandeurs physiques ou autres, tels que la température, la pression, la mesure de la qualité de l'air (sondage de la concentration de certains gaz), la magnitude des séismes, les mouvements, les intrusions, les captures d'images, la luminosité, etc.

La modélisation d'un WSN, le montre comme étant un système autonome, spontané et sans infrastructures fixes puisant des technologies ubiquitaires. Son modèle est fondé sur celui des systèmes contextuels qui le décrit sous forme d'une exploration combinée dans une même infrastructure des connaissances, des technologies de recherche et des utilités du contexte de la problématique mise en jeu, afin de générer une réponse appropriée à la requête recherchée [6]. Par similitude au modèle des systèmes contextuels, les WSN se développent autour de la détection, l'interprétation, la diffusion et la réaction, ils sont donc conçus autour du principe de la couverture et de la connectivité physique et logique [7]. Les WSN sont une collection de

centaines voire même de milliers petits capteurs munis de minuscules équipements radio et implémentant des algorithmes appropriés, afin d'accomplir une fonction commune.

Le choix d'utilisation de réseaux de grande taille pour répondre aux besoins de diverses applications est justifié [24] et il compense la petite taille et le faible coût unitaire des capteurs qui révèlent des faibles capacités de calcul, de mémoires et de portées de transmission de ceux-ci. Le déploiement de ces nœuds de capteurs peut être élaboré de façon précise en leur affectant des positions particulières, ou bien de manière aléatoire et n'exigeant aucune étude prédéterminée de leurs positions éventuelles.

Dans la plupart des cas [8], que ce soit pour des raisons de maintenance ou d'administration, l'accès aux espaces des WSN est difficile sinon impossible. Il est par conséquent, judicieux d'œuvrer à ce que la durée de leur bon fonctionnement soit maximale, ce qui impose la parcimonie dans l'utilisation de l'énergie des batteries des nœuds de capteurs [20], [24].

I.3. Réseaux de capteurs sans fil : Etat de l'art et problématiques

Grâce à leurs interfaces radio, les nœuds déployés dans une zone d'intérêt sont capables de s'autogérer et d'interagir pour se relayer leurs données, jusqu'à la station de base, en utilisant des liens radios multi-sauts. Il s'agit en fait, de l'appropriation d'un protocole de routage pour exécuter le processus nécessaire à la mise en place des chemins à adopter et à leur établissement par les nœuds de capteurs. Ceci, est concrétisé en sélectionnant le chemin adéquat [61], [75] pour la transmission des données en vue, de permettre une bonne combinaison de métriques de performances réclamées.

En effet, tous les protocoles de routage partagent le besoin pour la réalisation des mêmes objectifs en vue, de l'amélioration des aspects de performances des WSN [41], tels que le service attendu du réseau, l'amélioration de la capacité de survie, la disponibilité et la réactivité, la réduction de la complexité, l'augmentation de la durée de vie des nœuds de capteurs, le contrôle efficace de la consommation d'énergie ou la minimisation du retard de transfert des informations critiques, qualité de service (QoS),...

A partir de là il est évident, que pour prolonger la durée de vie d'un réseau moyennant l'assurance d'une meilleure efficacité énergétique, on s'affronte à la faible puissance énergétique individuelle que possèdent ses nœuds capteurs, ce qui constitue par conséquent, un défi particulièrement majeur à évaluer et à considérer. De ce fait, la taille et le design des nœuds font qu'ils soient dotés de ressources très limitées, notamment celle concernant l'énergie embarquée dans leurs batteries, puisqu'elle est la contrainte clé qui conditionne aussi bien, leurs fonctionnement et usage que leur durée de vie.

La sélection des stratégies de routage est un problème très décisif dans les WSN, il est lié à l'objectif du déploiement. Dans notre travail, nous nous intéressons au critère de l'efficacité énergétique pour l'optimisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil en prenant en compte l'aspect relatif à l'organisation du routage à travers l'adaptation dynamique à la charge du trafic.

Le challenge seulement au niveau du contexte matériel des nœuds de capteurs ne permet pas d'assurer des gains significatifs, en termes d'efficacité énergétique et ce, malgré les nouvelles progressions technologiques. En effet, parmi les solutions proposées dans ce sens, il y a celle qui consiste à la récupération de l'énergie ambiante (l'énergie photovoltaïque, la récupération de l'énergie thermique ou la conversion de l'énergie acoustique) [115], [116], [122]. Aussi, dans d'autres études on propose une technique de réduction de la consommation au niveau de l'architecture du microcontrôleur en y créant, une partition qui sera réservé au processeur de réveil et une autre au processeur principal. Malgré cela, l'inconvénient majeur que présente les batteries des nœuds de capteurs est lié à la limitation de leurs durées de cycles de vie (3000 à 4000 cycles), ce qui impose leur remplacement. En plus, il y a d'autres limitations en termes de leurs recharges qui peuvent surgir dans des conditions physiques spécifiques telles que les températures extrêmes (négatives ou positives).

À ce jour, grâce à l'avantage qu'offre la structuration de la connectivité sans fil du réseau pour permettre une optimisation globale de la consommation d'énergie dans les WSN, beaucoup de travaux de recherche ont été entrepris et se sont intéressés à la problématique de l'économie des dépenses énergétiques, à travers la conception de plusieurs algorithmes pour le développement de nouveaux protocoles de routage. Dans la littérature scientifique destinée aux réseaux de capteurs sans fil, c'est l'une des études phares les plus menées et qui ne cesse de permettre la réalisation de diverses applications et l'exploitation de larges champs d'intérêt.

En plus, il s'agit d'une problématique qui est fondamentalement majeur, puisque de laquelle, dépend essentiellement l'activité et la durée de vie des nœuds et donc du réseau en entier. Ce qui, justifie par conséquent, notre orientation dans les travaux de cette thèse.

Notre réflexion de ce fait, pour un état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil portera sur la prospection des travaux existants qui traitent les protocoles de routage en vue, d'aboutir à l'optimisation souhaitée de la consommation énergétique.

Sur l'ensemble, des principaux protocoles de routages, le protocole LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est considéré comme la base pour tous les protocoles hiérarchiques proposés par la communauté scientifique. Il présente des avantages certes, mais

aussi des inconvénients qui n'arrangent pas de manière performante le rendement en efficacité énergétique sollicitée dans les WSN. De même, le protocole PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) qui est une amélioration de LEACH, présente aussi des limitations de performances.

Pour surmonter ses inconvénients, de nombreux chercheurs élaborent de plus en plus, des schémas de protocoles orientés efficacité énergétique en proposant des versions modifiées des protocoles LEACH et PEGASIS ou autres.

Dans les paragraphes suivant nous présentons brièvement quelques travaux récents qui traitent la conservation de l'énergie pour l'extension de l'autonomie énergétiques des réseaux de capteurs sans fil.

I.3.1. Le protocole de routage Cluster based Multipath Routing Protocol (CMRP)

Dans [118] les auteurs ont proposé le protocole de routage proactif Cluster based Multipath Routing Protocol (CMRP) pour lequel tous les chemins sont calculés au préalable. Le protocole CMRP se base sur le clustering et le mode multi-chemin pour l'acheminement des données vers la station de base. C'est une approche qui convient au réseau statique.

La station de base se charge de calculer le chemin de routage et de surveiller l'énergie résiduelle de chaque nœud de capteur du réseau. Le fonctionnement de ce protocole comprend quatre phases : découverte des voisins et construction de la topologie, sélection des CH et la formation des clusters, diffusion des données, reclustering et re-routage. Ce protocole évoque dans certaines circonstances des problèmes au niveau de la sélection des Clusters Heads et des chemins de routage.

I.3.2. Le protocole Energy-Efficient LEACH (EE-LEACH)

Les auteurs dans [119] ont présenté un protocole de routage baptisé Energy-Efficient LEACH (EE-LEACH). Il est orienté efficacité énergétique pour prolonger la durée de vie du réseau en offrant, un routage basé sur une collecte efficace de données et une mise en cluster optimale. Les nœuds sont déployés dans la zone de détection suivant une probabilité de couverture qui respecte le modèle de la distribution gaussienne. Les nœuds avec l'énergie résiduelle les plus élevées sont sélectionnés pour transmettre les données vers la station de base et les autres nœuds sont ignorés dans l'opération de routage, ce qui améliore le taux de remise des paquets ainsi que la préservation de l'énergie du réseau. Cependant, ce protocole présente des inconvénients qui résident particulièrement, dans la couverture insuffisante qui est manifeste ainsi que, les

surcoûts énergétiques inutiles qui sont générés lors des calculs de l'énergie résiduelle des nœuds.

I.3.3. Le protocole Routing Algorithm using the Ring-Zone (RARZ)

De même autres conceptions de protocoles de routage ont été proposés. Dans l'article [120] on présente pour un protocole multi-sauts un algorithme de routage utilisant le modèle RARZ qui signifie Routing Algorithm using the Ring-Zone basé sur une zone d'intérêt en anneaux. Dans ce modèle, les décisions de routage sont prises en fonction de l'énergie restante dans les nœuds de capteurs et le routage effectué est basé sur la localisation sans qu'il soit nécessaire que les nœuds connaissent leurs positions respectives. En fait, le protocole partitionne le réseau en anneaux concentriques autour de la station de base et chaque nœud s'assigne à un anneau particulier, connu sous l'appellation "ring ID". Un routage multi-sauts est alors effectué et les nœuds au sein des anneaux internes transportent les données des anneaux externes vers la station de base.

Cependant, les auteurs de ce protocole ont négligé le facteur de qualité de la liaison dans la décision de routage, qui est également un facteur important en raison des contraintes limitées imposées aux WSN. Puisque ceci, risque d'impliquer des retransmissions de paquets de données.

I.3.4. Le protocole Hierarchical Energy Efficient Clustering Algorithm (HEEC)

Dans cet autre travail [121] le protocole développé Hierarchical Energy Efficient Clustering algorithm (HEEC) introduit un nouvel algorithme de clustering et de sélection de nœuds CHs capables de gérer les différents nœuds de capteurs. Il permet de minimiser la charge énergétique du réseau en la répartissant de manière uniforme entre ses différents nœuds. La station de base sélectionne le CH sur la base de sa proximité et de son énergie résiduelle. Puis, le chemin optimal pour le routage est déterminé par le CH en utilisant, la méthode DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Routing).

La station de base vérifie la capacité énergétique et la distance du CH du round précédent avant de décider de sa réélection afin, d'économiser de l'énergie et d'éviter qu'un seul CH ne s'épuise en énergie. Sinon, le nœud qui vérifie le mieux ces paramètres sera élu nouveau CH. Ainsi, le protocole HEEC tente de maintenir globalement une durée de vie du réseau en équilibrant la charge énergétique sur le réseau. Toutefois, ce protocole génère des dépenses énergétiques supplémentaire relatives essentiellement au nombre de messages de contrôle échangés.

Il est par ailleurs, évident que le contexte des nœuds de capteurs dans les réseaux sans fil impacte extrêmement la durée de vie du réseau en entier, De ceci, il est donc utile de rappeler de façon générale les architectures matérielles des nœuds capteurs et des réseaux de capteurs sans fil.

Tous les autres aspects des réseaux de capteurs sans fil en relation avec notre thématique seront présentés dans la suite de ce chapitre, ainsi qu'au niveau d'autres parties de ce mémoire. Aussi, le chapitre III sera consacré à la notion de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil et à une étude détaillée non-exhaustive sur les principaux protocoles de routage.

I.4. Architecture matérielle des nœuds capteurs sans fil

Au vu, du contexte des réseaux de capteurs sans fil, les nœuds sont des capteurs intelligents (Smart Sensors) de petite taille et implémentent des fonctionnalités avancées. L'architecture d'un nœud capteur sans fil [7], [18], [27], [36] est illustrée sur la Figure 1.1. Elle est composée principalement de quatre unités fondamentales :

- a. L'unité d'acquisition qui comporte un ou plusieurs capteurs embarqués conçus dans le nœud, pour récolter des informations relatives à leur environnement et un convertisseur analogique/numérique (CAN).

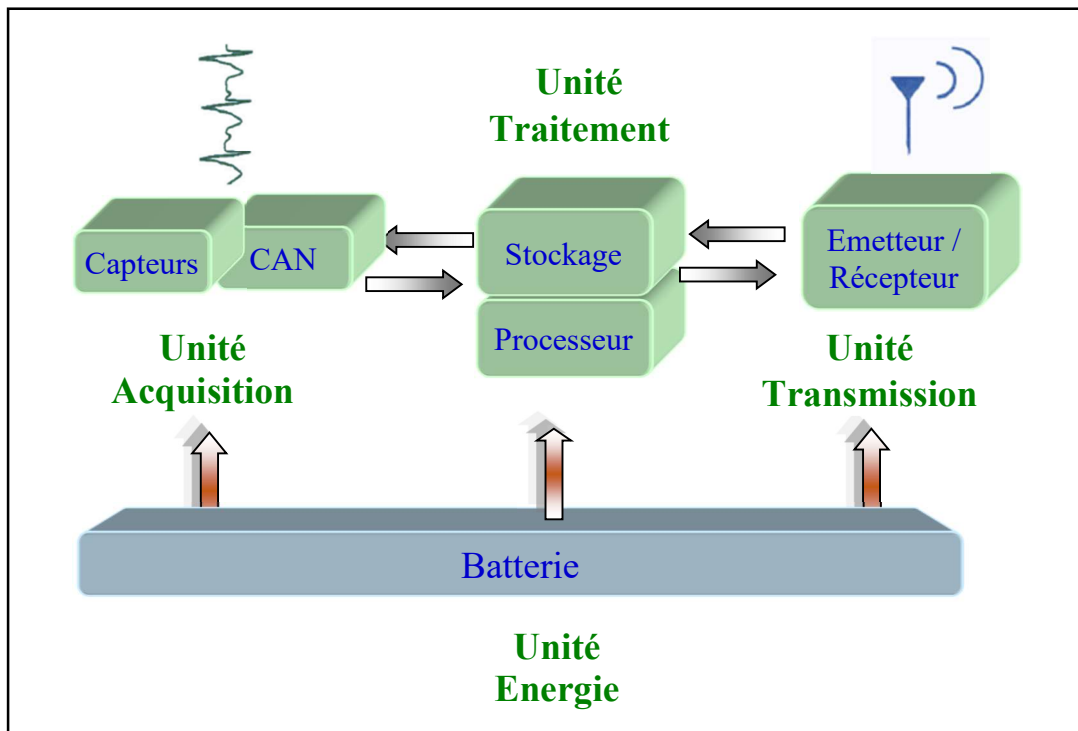


Figure 1.1 : Architecture matérielle typique d'un nœud capteur sans fil

Ce dernier, converti les signaux analogiques provenant des capteurs en signaux numériques, avant qu'ils soient transmis à l'unité de traitement. L'unité d'acquisition a par conséquent, l'aptitude de détecter de façon statique, dynamique ou selon les besoins stratégiques de l'application les conditions ambiantes de son milieu physique et les transformer en signaux mesurables de natures très différentes : électriques, électromagnétiques, photoniques, acoustiques, vibratoires, ou autres.

- b. L'unité de traitement dite aussi de calcul est un assemblage de processeur et de la mémoire appelé également MCU (Micro Controller Unit). A sa charge, le traitement et le transfert de données de l'unité d'acquisition vers celle de transmission tout en assurant, le contrôle de la collaboration des nœuds capteurs et des protocoles de communication dans le réseau.

Cette unité est une carte physique implémentant le système d'exploitation. Elle est responsable de l'exécution du code générant le comportement aussi bien des nœuds dans le réseau que l'analyse et le traitement local des données pertinentes détectées. Afin de réduire l'activité de l'unité de transmission, le traitement local des données est souvent recommandé. Ainsi, les données captées et traitées sont soumises à l'unité de transmission [14], [38]. Aussi, il est à noter que le système d'exploitation contenu dans les nœuds de capteurs permet leur reprogrammation, ce qui est très sollicitée dans le cas d'un changement des besoins de l'application mise en œuvre.

- c. L'unité de transmission est composée d'un émetteur/récepteur (module radio) utilisant des communications sans fil type radio-fréquence (RF) à faible portée et à bas débit engendrant ainsi une consommation d'énergie très limitée. Cette unité assure les communications entre les nœuds de capteurs dans le réseau et vers la station de base [35], [44]. Le fonctionnement de cette unité est généralement déclenché selon trois modes de trafic, suivant le choix du mode de son activité [7] :

- Mode Actif correspond au mode pendant lequel les fonctions d'émission ou de réception s'exécutent. Respectivement, ces fonctions traduisent les phases d'envoi des données par le nœud et celles lors desquelles il les reçoit.
- Mode Idle ou écoute sans communication : durant ce mode le MCU du nœud capteur est inactif et ce dernier n'effectue aucune communication ainsi, son énergie est conservée même si d'autres périphériques sont actifs, par exemple l'horloge interne ou le timer. Il en déduit que l'énergie consommée par les nœuds

capteurs lors de ce mode est inférieure à celle utilisée au cours de l'émission ou la réception.

- Mode Sleep ou sommeil : au cours de ce mode le nœud de capteur est inactif et ne procède à aucune activité de transmission. A la suite, de l'achèvement du temps alloué à ce mode le nœud de capteur bascule au mode idle. On note que lors de ce mode le MCU et la plupart des périphériques internes sont désactivés et ne peuvent être activés que par un événement (interruption externe).

d. L'unité d'énergie ou la batterie possède un rôle très décisif notamment, en ce qui concerne la durée de vie du réseau puisqu'elle est la source d'alimentation de toutes les composantes du nœud. Or, la contrainte d'autonomie énergétique des nœuds [15], [44] concurremment à la taille réduite des batteries dans un système miniaturisé font que la charge d'énergie dont elles disposent reste très limitée en plus, qu'elles ne sont généralement ni rechargeables ni remplaçables.

Les nœuds de capteurs sans fil sont alors conçus à l'image des systèmes embarqués. En plus, selon les applications pour lesquelles ils sont dédiés, les fonctions des nœuds des WSN sont extensibles et ils pourraient inclure d'autres modules spécifiques, tels que les systèmes de géolocalisation (GPS, ...), des périphériques supplémentaires par exemple des ports série/USB ou les systèmes de récupération et de génération d'énergie (cellule photovoltaïque, ...) sans avoir à changer la batterie embarquée. Également, les nœuds de capteurs peuvent introduire la fonction d'actionneurs capable de communiquer sans fil et de changer de position pour se déplacer de façon commandée (drone, ...) ou proprement autonome.

Il convient de rappeler que les stratégies de dimensionnement et d'architecture de la plateforme matérielle d'un réseau de capteurs sans fil, conjointement à l'évolution technologique relative à la conception des nœuds de capteur sans fil ont générés des modèles très variés de ces derniers et qui sont convenables aux diverses circonstances et conditions.

Le tableau 1.1 montre un extrait [16] de l'évolution des caractéristiques de quelques types de nœuds capteurs, notamment, celles relatives aux spécifications et performances à leurs microcontrôleurs.

Micro-contrôleur	Année	Bus de données	Mémoire - Quantité	Tension	Fréquence	Consommation	Énergie
Phoenix	2008	8 bits	64*10bits IMEM 128*10 bits IROM 52*40 bits DMEM	0,5V	106KHz	29,6pW deep sleep	2,8 pJ/cycle actif
Accelerator Based Processor	2011	8 bits	2*2KB SRAM	0,55V	12,5MHz	6µW deep sleep 48 – 78µW actif	678 pJ/tâche <=> 0,44 pJ/inst
SleepWaker	2013	16 bits	16KB PMEM 2KB DMEM SRAM + 1 cache 32*16bit	1-1,2V (ext) 0,32- 0,48V (int)	25MHz (Asservi)	174µW actif 1, 69µW deep sleep	2,6 pJ/cycle
ULSNAP	2014	16 bits	4KB PMEM 4KB DMEM SRAM	0,95-1,2V	47-93MIPS	4 – 9µW deep sleep	29-47 pJ/opération
ArmISSCC	2015	32 bits	8KB ULV SRAM 16KB SRAM	0,25-1,2V	29KHz - >66MHz	80nW deep sleep 850nW-6mW actif	11,7pJ/cycle à 0,35V
STM32L0	2014	32 bits	64-192KB flash 8-20KB SRAM	1,65-3,6V ext 1,2-1,8V int	32KHz- 32MHz	6,65mA actif 0, 29µA deep sleep	< 93 µA/MHz
SAMD21	2014	32 bits	32-256KB flash 4-32KB SRAM	1,62- 3,63V ext 1,2V int	32KHz- 48MHz	6,32mA actif 2, 70µA deep sleep	< 70 µA/MHz
CC2650	2015	32 bits	128KB flash 20KB SRAM	1,8-3,8V ext	32KHz- 48MHz	2,94mA actif 1µA deep sleep	(M3) 61 µA/MHz (SC) 8,2 µA/MHz

Tableau 1.1 : Evolution des spécifications et performances des microcontrôleurs dans les nœuds des WSN [16]

De par leur concept, nous apercevons à partir de la littérature scientifique que les plateformes matérielles (Hard) couramment employées dans la conception et la réalisation des nœuds de capteurs pour la mise en place des WSN, possèdent des caractéristiques communes dont le but est de pouvoir répondre aux exigences des réseaux.

Aussi, sur le tableau 1.2 est illustrée une comparaison extraite de quelques exemples de plateformes matérielles généralement utilisées pour la vision dans les WSN. Ces plateformes utilisent l'intelligence artificielle moyennant des capteurs distribués pour la vision intelligente et qui sont capables de surveiller différents points de vue d'une même scène telle que la détection, l'analyse des objets et la reconnaissance faciale, ce qui permet de surmonter les problèmes d'occlusion pouvant entraver l'objectif ultime du réseau.

Platform/Year	Imager/ Resolution (px)	Processor / Architecture	Transceiver / Freq. (GHz) @ Bitrate (kbps)	Application	Power consumption (mW)/Resolution @ Frame rate (fps) Energy per pixel (μ J/px)
Imote2 - based 2006	OV7649 640x480	PXA271 32-bit ARM5	CC2420 in Imote2 2.4 @ 250	Pattern recognition via motion détection	322 80x60 @ 8 8.38
MeshEye™ 2007	ADNS-3060 30x30 ADCM-2700 640x480	AT91SAM7S 32-bit ARM7	built-in CC2420 2.4 @ 250	Object detection via stereo matching	155 64x64 @ 0.5 75.68
WiCa 2007	OM6802 640x480	Xetal-II +8051 SIMD PE array + 8-bit CISC	CC2420 in AquisGrain 2.4 @ 250	Pattern recognition via background subtraction	500 320x120 @ 30 0.43
FireFly Mosaic 2007	OV6620 352x288	LPC2106 32-bit ARM7	CC2420 in FireFly 2.4 @ 250	Region clustering via background subtraction	114.5 352x288 @ 5.2 0.27
CITRIC 2008	OV9655 1280x1024	PXA270 32-bit ARM5	CC2420 in TELOSB 2.4 @ 250	Target tracking via background subtraction	970 320x240 @ 3.3 3.83
EyeRIS™- based 2010	Q-Eye 176x144	Q-Eye+NIOS-II SIMD PE array + 32-bit RISC	RF230 in IRIS 2.4 @ 250	Object detection via motion detection	1500 176x144 @ 15 3.94

Tableau 1.2 : Comparaison de quelques plates-formes WSN basées sur la vision [23]

Le plus souvent dans cette catégorie, les nœuds de capteur sont composés d'un microcontrôleur de 8 bits à 32 bits et utilisant les communications radios à faible consommation basées sur la norme IEEE 802.15.4 dont la fréquence est de l'ordre de 0.9 GHz à 2.4 GHz et le débit (ou bitrate en anglais) du flux atteint 250 kbps.

Comme rapporté auparavant, la fonction principale des plateformes de microcontrôleurs étant d'une part le traitement des données à savoir, l'exécution des programmes pré-embarqués des applications de Contrôle-Commande et d'autres part, leurs liens, les associant au module de transmission (réceptions, échanges, transfert des données traitées, etc.) et au module de conversion "CAN" (Analogiques/Numériques). Or, compte tenu des ressources très faibles dont disposent et fournies ces plateformes leurs limites (niveau Hard) sont donc manifestes. Ce qui, implique le besoin de faire des choix stratégiques de techniques et/ou de processus à l'échelle logiciel (niveau Soft).

Cette approche décrite comme étant conjointe, collaborative et alternative pourra aussi, se confronter à différents degrés de complexités, ce qui semble compromettrait davantage le développement des applications dans les WSN. Néanmoins, les potentialités des réseaux de capteurs sans fil et l'intérêt que leur porte les industriels et les chercheurs motivent de plus en plus, les travaux de recherches par la création quasi illimitée de multiples perspectives

d'applications en vue, de l'exploration et l'exploitation de nouveaux types d'objets et d'environnements intelligents, ce qui permet de lier et de projeter davantage la réalité physique dans le monde numérique.

I.5. Architecture du réseau de capteurs sans fil

L'automatisation des tâches et la mise "en réseau" de l'information ont concouru à la convergence des structures des réseaux de capteurs sans fil vers une architecture à connotation généraliste, respectant globalement la composition fonctionnelle de ses éléments [7], [45] : les Nœuds dans la zone de couverture, les Phénomènes a détecté, le(s) Puit(s), la Passerelle (Internet) et l'Utilisateur (Figure : 1.2).

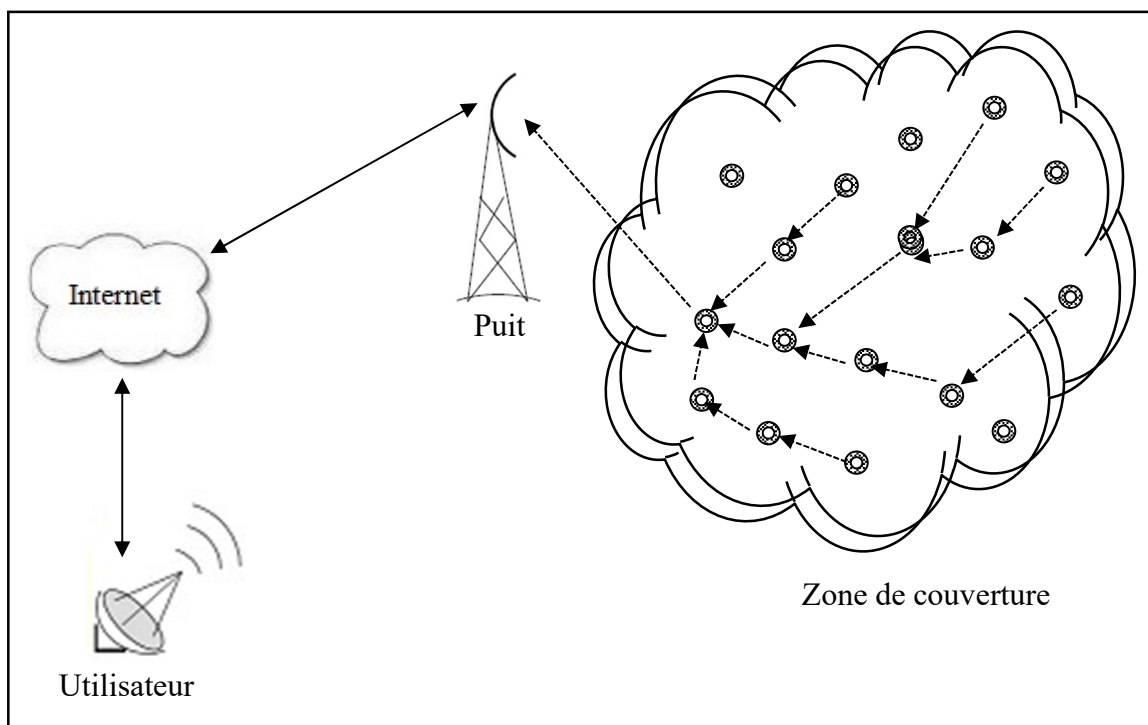


Figure 1.2 : Synoptique d'un réseau de capteurs sans fil

Le synoptique d'un réseau de capteurs sans fil ne repose sur aucune infrastructure fixe [26], [36]. Lors de l'utilisation des WSN, on assiste à un fonctionnement de nœuds de capteurs en corrélation avec l'absence d'infrastructure fixe.

Il représente une distribution dans un espace de couverture relativement grand de plusieurs nœuds de capteurs [4], [7], [46] communiquant sans fil entre eux ou avec une station de base dont l'objectif étant de répondre aux besoins d'applications bien définies (Figure : 1.2). Le seuil et la durée de l'état d'activation de ces nœuds de capteur est un défi prescrit évidemment par le contexte des applications, ainsi que par le niveau des ressources énergétiques dans tout le réseau.

L'étendue de l'espace de couverture exige la coopération des nœuds capteurs entre eux par le biais des communications multi-sauts [12], [32], [45] adaptées à des topologies fixes ou mobiles en utilisant des liaisons sans fil [34]. Cette collaboration entre les nœuds capteurs permet d'optimiser la collecte, la transmission et/ou le traitement des différentes données de leur environnement avant de les orienter vers une autre unité de commande en dehors de la zone de mesure [8]. Cette unité de commande est un nœud spécial appelé station de base ou aussi nœud puit (sink node). Elle est dotée de ressources matérielles et logicielles évoluées plus adaptées et plus développées lui permettant de collecter, traiter et stoker les informations écoulées des capteurs autrement dit, du réseau. Aussi, la station de base peut être connectée à Internet ou ayant un lien radio de type GSM (Global System Mobile communications) ou GPRS (Global Packet Radio Service) afin de, pouvoir communiquer avec un centre de contrôle en dehors de l'environnement du réseau pour l'exploitation de ce dernier. Il s'agit en fait, d'une concaténation de réseaux d'acquisition et de diffusion de données.

Les batteries des nœuds capteurs possèdent initialement une faible charge énergétique qui est proportionnelle à leur taille et elles sont très sollicitées. Ce qui limite ainsi, leur aptitude à maintenir une alimentation convenable plus longtemps. D'où, l'impératif de gérer de façon optimisée l'activité des nœuds pendant une longue durée pour éviter leurs "mort" prématurée.

I.6. Modèles de trafic de données

Dans un réseau de capteurs sans fil, les applications peuvent avoir des exigences très différentes en termes du modèle de trafic des données autrement dit, de la manière d'acquisition et de livraison de ces dernières. Un modèle de trafic de données adopté organise donc le mode d'activité des nœuds dans les réseaux. Il dépend foncièrement en plus des objectifs de l'application, de l'importance des données objet de son déploiement.

Avant qu'elles soient conduites vers l'utilisateur final, la collecte des informations dans un réseau de capteurs sans fil est opérée selon des scénarios appropriés [25] :

- Requête-Réponse (Query-Driven) : Cette méthode de demande de prospection d'information à partir du réseau s'appuie sur l'envoi d'une requête, usuellement par diffusion à partir de la station de base à un ou plusieurs nœuds de la zone de couverture (Figure 1.3). La réponse à cette demande est établie et envoyée ensuite par les nœuds de capteurs de la zone concernée à la station de base. Pour les applications basées sur des requêtes, des données peuvent être mises à disposition sur des nœuds intermédiaires tels que les nœuds chefs de clusters (Cluster Head), afin d'améliorer le processus de requête/réponse

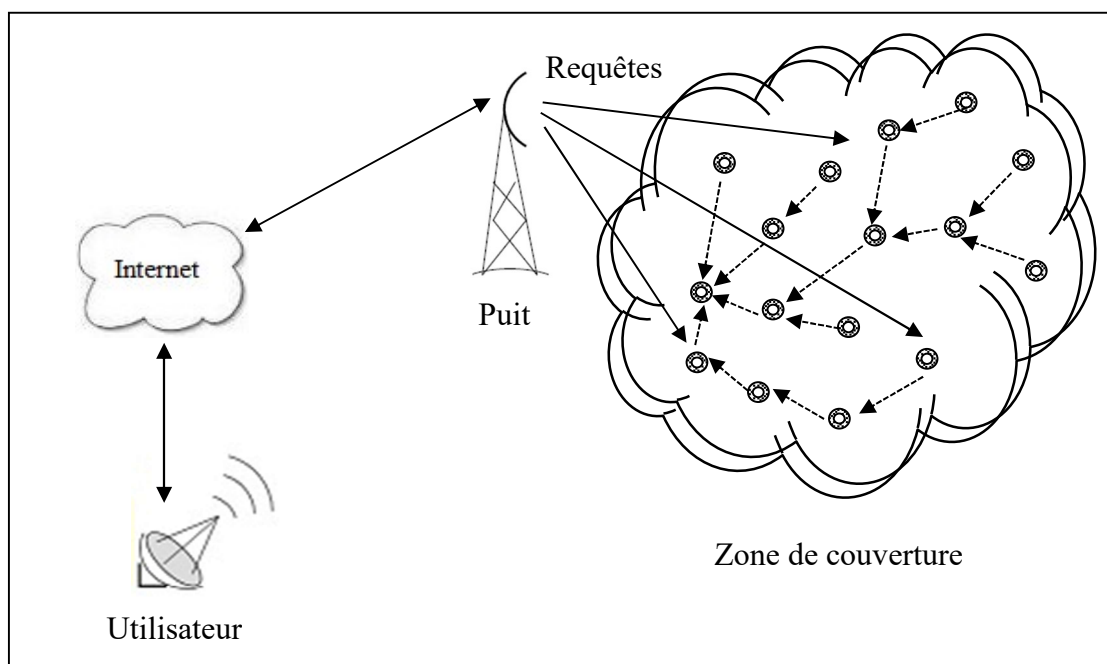


Figure 1.3 : Modèle de trafic de données "Query-Driven"

Ainsi, lorsqu'une requête est envoyée, les nœuds intermédiaires peuvent répondre avec les informations souhaitées sans avoir un temps de latence.

- Périodique (Time-Driven) : Lors de ce choix de modèle les nœuds envoient périodiquement les relevés d'informations concernant l'environnement supervisé (Figure 1.4). En recevant une requête de service, les nœuds de capteurs prélèvent les informations de leurs environnements et les transmettent par le biais du protocole de communication employé à la station de base. Ce scénario de trafic nécessite le contrôle de la connectivité du réseau pour assurer aussi bien, une bonne probabilité de livraison d'informations à sa destination que le suivi, de l'évolution des événements à surveiller. La définition de la fréquence d'échantillonnage détermine la période des relevés qui varie de quelques millisecondes à plusieurs heures ou jours selon le type de réaction de chaque application. L'utilisation de ce modèle de trafic permet aux nœuds de capteurs de passer en mode veille durant les intervalles de temps d'inactivités et de ne se mettre en activité pour l'acquisition des données qu'à des moments déterminés, ce qui prévient une surconsommation énergétique inutile.

D'autres mécanismes d'amélioration peuvent également être envisagés pour les flux de données périodiques, à savoir la compression ou l'agrégation qui peuvent être un bon choix, afin de réduire les paquets de données qui convergent vers la station de

base. D'ailleurs, c'est pourquoi, la plupart des applications reposent sur ce modèle de trafic de données.

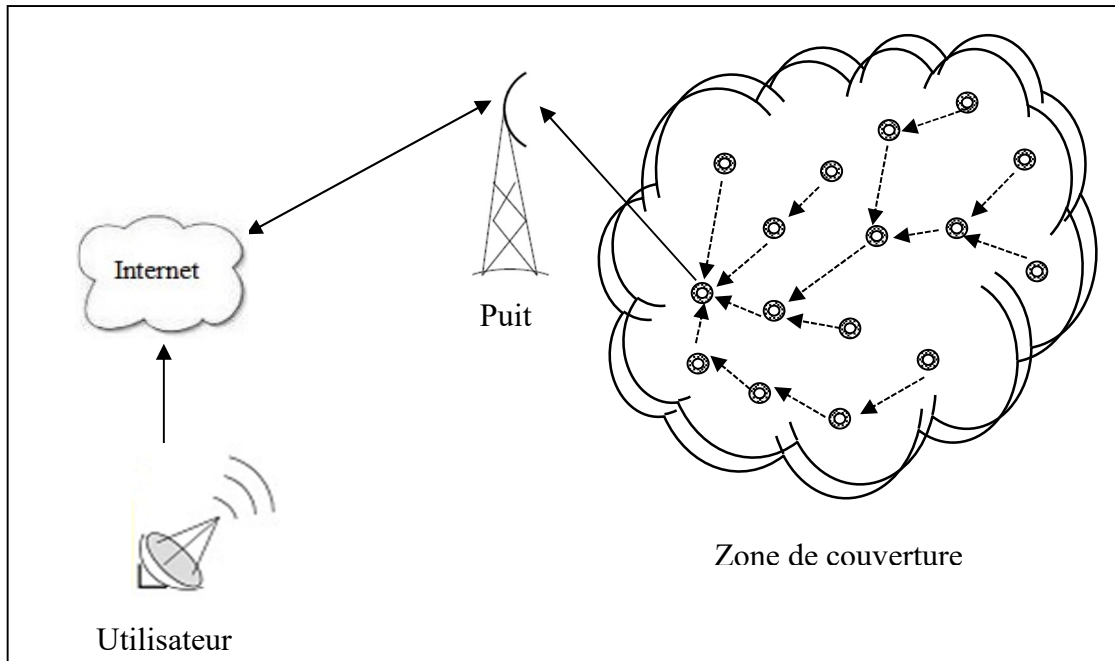


Figure 1.4 : Modèle de trafic de données "Time-Driven"

- Événementiel (Event-Driven) : Concernant ce type de modèle, le trafic de données est généré par la détection d'évènement survenant sur la zone de couverture du réseau [13], [49].

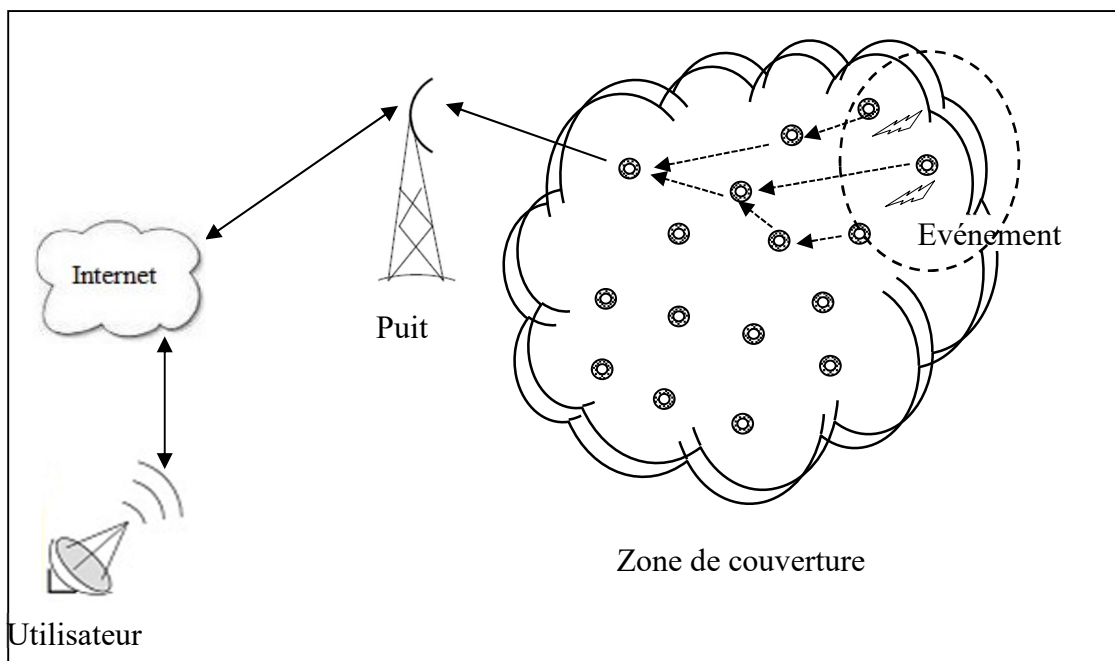


Figure 1.5 : Modèle de trafic de données "Event-Driven"

Les capteurs comparent les données captées (mesurées) aux valeurs de consignes (seuils). Lorsque, ces dernières sont dépassées, alors les données détectées sont aussitôt envoyées au puit pour exploitation (Figure 1.5). La conception de ce type de réseau consiste à la détection d'évènements limités dans le temps et non pas par des signaux continus. Les applications orientées évènement sollicitent une couverture satisfaisante du réseau ce qui permet d'accorder une localisation exacte des positions et une densité suffisante de nœuds de capteurs pour assurer une meilleure probabilité de la détection d'évènements. Il en résulte aussi, la bonne connectivité du réseau qui contribuera au moyen des protocoles de communication à faire parvenir l'information au puit avec moins de latence. Cet état, se veut possible même si on conserve une infrastructure de routage minimale, afin de maximiser la durée de vie de l'ensemble du réseau, car seuls quelques nœuds peuvent être utilisés pour relayer les paquets de données vers le nœud récepteur.

- Hybride : Dans certaines situations, on peut exiger une collecte de données de manière mixte. Ainsi, par exemple, les capteurs remontent les informations capturées toutes les périodes, mais s'il y a un événement qui apparaît entre deux périodes d'envoi, il sera déclaré aussitôt au puit sans attendre la période suivante.

La désignation d'un modèle de trafic de données peut changer dynamiquement avec le temps ou de façon particulière lors d'une requête spéciale de la station de base. Dans de telles circonstances, la mise en place de modèles de trafic différents impose généralement des compromis et des résolutions adaptées.

Il est par ailleurs important, de noter que dans son fonctionnement un réseau de capteurs sans fil, mets en jeu des protocoles de routage collaboratifs, qui engendrent des communications pour l'acheminement des données en maintenant des liaisons sans fil entre les nœuds et /ou l'utilisateur via la station de base. Ceci, tout en optimisant entre autres la consommation d'énergie, le temps de réponse, le délai de transit, la qualité de service, le niveau de performance même dans les situations d'instabilité de la couverture, Ces besoins d'optimisation ne sont pas exhaustifs et définissent le niveau de service imposé par l'application sujet de déploiement du réseau.

Le volet concernant les protocoles de routage et leurs rôles sera développé par la suite.

I.7. Modèle de la gestion des communications : Rôle et Découpage de la consommation énergétique

Dans les WSN, les nœuds de capteur ont la double fonctionnalité d'être à la fois des émetteurs/récepteurs de données et aussi des routeurs de données [31]. Par conséquent, la fonction de communication est effectuée pour deux raisons :

- Source d'informations : les nœuds capteurs sont des sources d'informations pour les événements de leur environnement, ils assurent les fonctionnalités de communication, afin de transmettre leurs paquets de données à la station de base.
- Routage d'informations : par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts, les nœuds capteurs participent également, à l'acheminement des paquets de données reçus d'autres nœuds vers une destination suivante, en s'accommodant une route (chemin) pour le transfert de données jusqu'à la station de base.

Usuellement, l'approche adoptée au niveau de la gestion de la fonction des communications dans les réseaux de capteurs sans fil a le même fondement que celui proposé par l'ISO (International Standards Organisation), mis en place dans les réseaux classiques, dont l'architecture est organisée en couches selon le modèle de référence OSI (Open Systems Interconnection) [18].

Ce modèle normalise les interconnexions et les coopérations entre les dispositifs homogènes et/ou hétérogènes des différents constructeurs, communicants dans un réseau de transmission. Son principe est conçu sur la base du découpage fonctionnel, structuré en sept couches de l'ensemble des fonctionnalités communicationnelles du réseau.

Chaque couche est dotée d'un rôle particulier et offre ainsi un service bien défini. Elle forme un ensemble homogène et cohérent de processus ou fonctions destinés à effectuer de manière précise une opération ou à fournir un service assurant alors l'évolutivité du système. Deux couches adjacentes ont généralement des rôles différents et indépendants et les échanges d'informations entre elles se font à travers leurs interfaces (primitives de services).

Au niveau des WSN en vue, d'assurer leurs communications, les nœuds de capteurs implémentent le modèle OSI. Ce qui traduit le passage du contexte "l'électronique du capteur" jusqu'au celui représentant le niveau "application", tout en garantissant les fonctionnalités correctes et les objectifs des applications mises en place dans la conception du réseau.

Néanmoins, l'adoption absolue du modèle OSI à sept couches habituelles, pour les WSN s'annonce trop complexe [65] et incompatible compte tenu d'une part, de l'interdépendance des paramètres intrinsèques de ses nœuds capteurs, ce qui impacte les réserves énergétiques en provoquant un surcoût énergétique inutile au niveau de la consommation d'énergie. Et d'autre part, de la nature de certaines applications dont le critère temps est particulièrement imposé par le temps réel.

D'où, la nécessité d'adapter tous les mécanismes de gestion, les algorithmes et les protocoles de routage valables pour les réseaux sans fil ou les réseaux Ad-Hoc à la contrainte de la consommation énergétique propre aux réseaux de capteurs sans fil.

Ces contraintes énergétiques et temporelles prises en compte dans certaines applications exigent l'implémentation de mécanismes particuliers de contrôle des échanges. C'est pourquoi la pile de protocole employée pour les WSN comme illustrée sur la Figure 1.6 se compose uniquement de cinq couches à savoir les couches basses et les couches hautes [8], [50].

Les couches basses (physique, liaison de données, réseau) sont essentiellement responsables de l'acheminement physique des informations et dépendent du support physique. Tandis que, les couches hautes (transport et application) ont pour rôle le traitement des informations et la gestion des échanges.

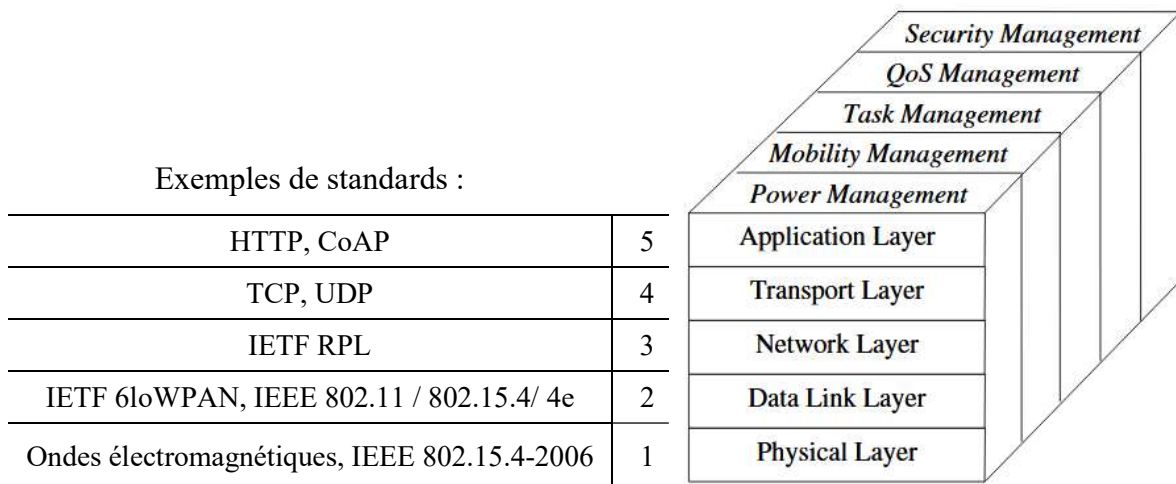


Figure 1.6 : La pile protocolaire dans les réseaux de capteurs sans fil [18], [19], [65].

Il faut bien évidemment préciser que, le fonctionnement de ce modèle doit intégrer aussi une approche de management global visant la maîtrise et l'optimisation de la consommation énergétique en vue, de préserver une durée de vie plus prolongée du réseau.

Dans la pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil, chaque couche possède un rôle et un fonctionnement bien défini et par conséquent un besoin énergétique particulier [26], [27] :

- a. La couche physique détermine le dispositif matériel. Elle permet l'activation et la désactivation du module radio et par le biais des techniques de traitement de signal [52], la définition et la gestion du support physique en adaptant l'information à transmettre (des ondes électromagnétiques) au canal de propagation radioélectrique sans fil [60]. Elle est responsable de la sélection de la fréquence d'émission, la détection du signal reçu et la mesure de sa puissance pour la comparer au bruit radio ambiant. Ce processus est utilisé par le mécanisme CCA (Clear Channel Assessment) pour vérifier si le canal est libre. Aussi, cette couche fournit des informations sur la qualité du signal RSSI (Radio Strength Signal Indication) et /ou de LQI (Link Quality Indicator) pouvant être utilisés par les couches supérieures, la gestion de la puissance de transmission, la modulation/démodulation ainsi que, le cryptage/décryptage des données [7], [37]. C'est la partie radio au niveau, de cette couche qui est la plus gourmande en énergie.

- b. La couche liaison de données permet aux nœuds l'accès et le partage du canal de transmission (Medium). En pratique, elle est décomposée en deux sous-couches : la sous-couche MAC (Medium Access Control) et la sous-couche LLC (Logical Link Control). Elle s'occupe de la formation du réseau, la gestion des communications, la sécurisation et la fiabilité des transmissions, etc. Elle est responsable de l'établissement des liens radios entre les nœuds pour garantir leur connectivité, tout en prévenant les pertes de paquets ou les phénomènes de collisions qui génèrent une dissipation inutile d'énergie due aux éventuelles retransmissions. Ceci, s'effectue par la mise en place des protocoles dont la charge étant la régulation de l'accès au medium. Les protocoles MAC (Medium Access protocol) les plus utilisés pour assurer l'accès au canal sont les protocoles à base de conflits d'accès, les protocoles sans (ou libres de) conflits et les protocoles hybrides. La Figure 1.7 représente les grandes catégories des protocoles MAC.

En revanche, dans la catégorie des protocoles MAC sans conflits on tente un partage efficace et équitable pour l'accès au canal. Ces protocoles adoptent des techniques de multiplexage prédéterminées et pré-programmées généralement, afin de prévenir l'occurrence des collisions. Ces techniques d'accès sont alors définies par : la répartition temporelle TDMA (Time Division Multiple Access), la répartition fréquentielle FDMA

(Frequency Division Multiple Access) et par la répartition de code CDMA (Code Division Multiple Access)

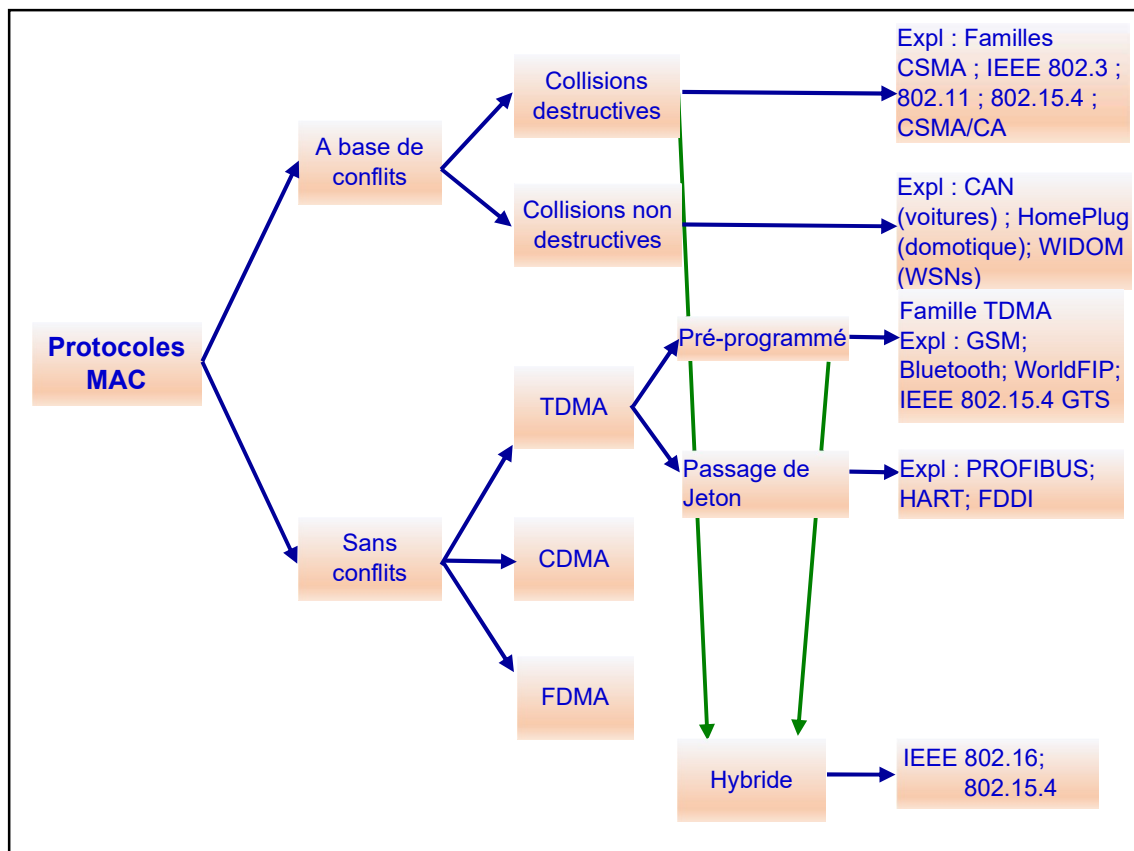


Figure 1.7 : Classification des Protocoles MAC [21]

Lors de son fonctionnement cette couche, coopère donc pour la limitation de la consommation d'énergie liée à la couche physique en plaçant fréquemment les composants radio en mode Sleep.

- c. La couche réseau s'occupe de la gestion du routage des données en établissant des chemins de communications entre les nœuds du réseau [36] [50]. Elle doit optimiser l'énergie, consommée par les nœuds de capteurs et durant les temps de latences nécessaires pour le transport des données [61]. Les défis à quoi cette couche doit aussi faire face sont : la topologie changeante et aléatoire des WSN, l'adressage des nœuds non requis, l'extensibilité due à la densité du réseau, la robustesse du réseau même en cas de panne de certains nœuds et les exigences de l'application qui détermine le modèle de trafic des données.

En conséquence, au niveau de cette couche, les solutions de routage qui permettent de contribuer à une efficacité énergétique consistent à mettre en place pour le routage des données soit des systèmes à base de communications indirectes (multi-saut) ce qui réduit la consommation énergétique en émission, soit des systèmes de communications directes utilisant des points d'accès et permettant ainsi la diminution des surcoûts pouvant être engendrés [62].

- d. La couche transport prend à sa charge la responsabilité de contrôler la congestion et de délivrer efficacement [47] le flux de données reçues par le nœud récepteur à l'application ainsi que, la gestion d'applications concomitantes sollicitant un même nœud [36]. En fait, la fonction de cette couche décrit une forme de parité entre l'émetteur et le récepteur. Le contrôle de la congestion se préoccupe de la surcharge du réseau par l'émetteur tandis que, le contrôle de flux évite la surcharge du récepteur. Les mécanismes mis en jeu dans la couche de transport s'adaptent de manière logique et assujetties aux conditions des WSN et rendant la consommation d'énergie plus raisonnable. Les protocoles généralement dédiés à cette couche sont les protocoles TCP (Transmission Control Protocol) et UDP (User Datagram Protocol) [53].
- e. Enfin, la couche application implémente l'ensemble des applications sur un WSN et constitue une interface qui permet à l'utilisateur l'interaction avec "le nœud" autrement dit, avec l'événement à contrôler. Elle est dotée de protocoles lui permettant l'agrégation et la compression des données pour réduire leur taille, le traitement de requêtes d'autres nœuds (création, diffusion ou action spécifique) ainsi que, la gestion des mécanismes de communication dans le réseau.

En plus, de ces cinq couches cette pile intègre généralement d'autres plans de gestion qui aident les nœuds de capteurs à coordonner leurs tâches tout en réduisant la consommation d'énergie [43]. L'intégration de ces niveaux contribue au management efficace du réseau de part, le suivi et la gestion de la mobilité de ses nœuds, l'équilibre de la consommation énergétique, la distribution des tâches, la qualité de service (QoS) ainsi que, le management des plans de sécurité [22], [36].

Puisque le fonctionnement des nœuds dans les WSN est amplement influencé par la nature des nœuds capteurs (type du module de nœud) et leurs niveaux d'énergie qui varient, le plan de la

gestion des tâches (Task management) a donc pour rôle l'assurance de l'équilibre de la répartition des tâches. Les tâches de détection sont alors assignées et seuls les nœuds nécessaires sont affectés. Les autres peuvent se faire attribuer les fonctions d'agrégation, de compression, de routage ou simplement se mettre en mode Sleep, ce qui contribue ainsi à l'optimisation de la consommation d'énergie.

Quant au plan de la gestion de la mobilité (Mobility management) des nœuds, il est responsable de garder la traçabilité des positions physiques des nœuds et de maintenir en permanence le suivi des changements de leurs emplacements afin, de préserver continuellement un chemin vers les nœuds ou la station de base ce qui permet d'avoir une représentation récente du réseau.

La gestion de la qualité de service (QoS management) est un plan qui ne manque pas d'importance dans les WSN notamment, s'il existe une exigence de temps réel concernant les prestations de données. Ce plan s'attribue la responsabilité de la détection et la résolution des problèmes des nœuds, il prend à sa charge le traitement des tolérances aux pannes, le contrôle des erreurs et l'optimisation des performances en termes de certaines métriques de qualité de service.

Au niveau du plan de la gestion de la sécurité (Security management), le processus mis en jeu a pour objectif la surveillance et le contrôle du comportement lié à la sécurité d'un réseau. La fonction principale de la gestion de la sécurité consiste à contrôler les points d'accès aux données critiques ou sensibles. Elle inclut également l'intégration transparente de différents modules de fonctions de sécurité, y compris le chiffrement, l'authentification et la détection d'intrusion.

Enfin, l'action du plan de la gestion de l'alimentation énergétique (Power management) porte sur la conservation d'énergie en gérant au mieux la consommation énergétique sur tout le réseau. Ce plan étant responsable des décisions à adopter pour l'économie de l'énergie ainsi que les stratégies visant à augmenter la durée de vie du réseau telle que, la mise en veille des nœuds dont le niveau d'énergie a atteint un seuil critique après réception ou envoi de message et la diffusion de ces niveaux énergétiques aux nœuds voisins pour pouvoir décider de la participation de ces derniers au routage.

I.8. Paramètres et spécificités influençant la conception et le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fil

Composés de nombreux nœuds de capteurs fixes ou mobiles, les réseaux de capteurs sans fil sont dotés de propriétés fondamentales et très caractéristiques [7], [64], telles que la capacité de progression, la bande passante, la portée de transmission, la puissance de stockage et l'auto-organisation même dans les endroits où la présence humaine n'est pas possible.

I.8.1. Caractéristiques paramétriques des réseaux de capteurs sans fil

Toutefois, il est à préciser que la principale caractéristique imposante d'un nœud de capteurs sans fil étant sa petite taille, de laquelle en découlent plusieurs autres telles que la petite dimension de la batterie qui renseigne sur la valeur initiale de sa charge, la vitesse de calcul et de transmission. En effet, une autre caractéristique aussi évidente dans les WSN étant son autonomie, celle-ci, concerne directement sa source d'énergie et son mode de fonctionnement. La Figure 1.8 suivante montre des exemples de capteurs ayant des niveaux de miniaturisation différents (sources : Agence SUFRAMA / Brasil Gov. (en haut) et NASA / USA Gouvernement (en bas). La taille d'un nœud capteur peut atteindre des tailles très infinitésimales telles que les nœuds Smart Dust.

L'impact de la miniaturisation dans les WSN montre et impose par conséquent, les limites des ressources et des performances de ceux-ci.

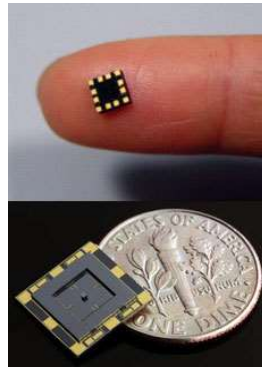


Figure 1.8 : Exemples de nœuds de capteurs

Le paradigme du fonctionnement des nœuds de capteurs composants les WSN est alors déterminé par leur aptitude de se créer des réseaux ad-hoc pouvant fonctionner et se gérer de façon autonome et leur déploiement ne requiert aucune infrastructure (Réseau sans liaisons filaires). Dans de tel contexte, les WSN doivent eux-mêmes aussi assumer les fonctions de routage, en utilisant des médias de communications sans fil bidirectionnelles très diverses.

De par, leurs ressources logicielles et matérielles limitées une conception générique et efficace des WSN n'est pas possible. La conception des WSN est tributaire des applications pour lesquelles ces derniers sont dédiés. On distingue alors de nombreux types de nœuds de capteurs qui sont développés selon la fonction de la détection et / ou d'action/réaction éventuellement requise [26], [27]. Il existe de nombreux types de nœuds capteurs sans fil dont la conception est fonction du caractère de la détection requise [8], [54] soit :

- La température, la pression, le taux d'humidité, les niveaux, les ondes acoustiques, ...
- La circulation des véhicules, l'intensité lumineuse, le taux de bruit,...
- La présence ou l'absence de certains types d'objets, la composition du sol et de l'air.
- Les niveaux de fatigue mécaniques sur des objets,...
- Le suivi réel des paramètres divers tels que la vitesse, la direction, la taille d'un objet, la régulation de l'irrigation des surfaces agricoles, ...
- La supervision des systèmes biologiques
- Etc....

Les nœuds de capteurs sont distribués selon différentes structures physiques et électroniques, soit acoustiques, thermiques, chimiques, mécaniques, électromagnétiques, à rayonnements optique ou ionisant,....

Les WSN possèdent alors des spécificités typiques très variées [30] et qui sont prises en compte lors de leur fonctionnement, telles que :

- La forte densité des nœuds (souvent de l'ordre des milliers)
- La contrainte d'énergie qui est le principal problème pour ce type de réseaux [55]. Au niveau de chaque nœud, il y a une quantité d'énergie limitée dans sa batterie qui n'est ni rechargeable ni remplaçable. D'où, l'intérêt de prendre en considération lors de toute utilisation du réseau la problématique de la consommation d'énergie pour la maintenir au minimum afin de prolonger la durée de vie utile du réseau.
- La topologie du réseau est variable soit du fait de mode de placement aléatoire des nœuds, soit suite à leur mobilité ou de l'épuisement de leur énergie.
- La tolérance aux défaillances [57] : afin de garantir la couverture en acquisition et en connectivité ainsi que la satisfaction des délais de transit, la défaillance d'un nœud n'affecte pas grandement le fonctionnement et les performances du réseau en entier [58], [59].
- Le passage à l'échelle ou la scalabilité rappelle la capacité inhérente d'auto-organisation du réseau qui prend en considération le très grand nombre de capteurs, en ajoutant ou en supprimant automatiquement des nœuds, sans avoir besoin de reconfigurer le réseau.

Ce concept de scalabilité met en exergue l'adaptation de l'architecture et les protocoles de communications du réseau à la présence ou à la perte des nœuds dans le réseau.

- La portée de transmission des informations dans le réseau dépend bien évidemment des rayonnements des antennes utilisées et de la distance entre les nœuds qui ne doit pas dépasser un certain seuil puisque la consommation d'énergie est proportionnelle à la distance séparant les nœuds de capteurs. En plus, lorsque la topologie du réseau présente des obstacles ces derniers entravent la transmission des données entre les nœuds [36]. On aperçoit alors, une zone de communication au niveau de laquelle le nœud de capteur peut procéder à des communications avec des nœuds avoisinants appartenant au même rayon de cette zone. Et une zone de perception définit par le nœud de capteur comme la zone de détection d'événements et acquisition de données [63].
- Les bandes passantes utilisées dans les WSN sont généralement limitées et distribuées à tous les nœuds du réseau de capteurs
- Le flux d'acheminement de l'information des capteurs du réseau vers la station de base est discontinu. Les messages sont envoyés d'un capteur à l'autre (routage multi-saut) jusqu'à l'arrivée à une station de base, il s'agit des communications de type « many-to-one » et non pas « many-to-many ». Les requêtes des utilisateurs sont déterminées selon les attributs ou la localisation. En effet, les communications peuvent être déclenchées par des requêtes, des événements ou autres, leurs chemins vers la station de base est déterminé dynamiquement de manière adaptative aux conditions du réseau.
- Les contraintes matérielles dont la principale étant liée à la taille des nœuds de capteurs qui doivent être en plus, autonomes, résistants et ayant la capacité d'adaptabilité aux différents environnements qui sont souvent extrêmes.
- Les contraintes liées à l'administration de l'énergie fournie par les batteries en vue, que le mode de la consommation de l'énergie des nœuds soit très raisonné.
- Le caractère embarqué des nœuds impose à ceux-ci, des contraintes très typiques mais non spécifiques, elles affectent tous les niveaux que ce soit les composants utilisés, des protocoles de communication, le système d'exploitation adopté ou des applications mises en jeu.

1.8.2. Stratégie du déploiement des nœuds de capteurs sans fil

Le design des réseaux de capteurs sans fil coopte aussi un intérêt important du fait de l'impératif de la corrélation naturellement présente entre la plateforme physique du nœud de capteurs et de son système d'exploitation. Selon les différentes missions et exigences des applications à

réaliser [70], la configuration et la stratégie du déploiement des nœuds de capteurs sont définis [8] tout en tenant compte de la tolérance aux pannes pour contribuer à la garantie d'une durée de vie optimale. L'action du déploiement ne dépend pas uniquement du nombre de nœuds prévu pour la couverture mais, il y a d'autres paramètres aussi pertinents à prendre en considération notamment, la densité de déploiement pour assurer une certaine densité de probabilité de couverture [56], [79] et la méthode de celle-ci : déterministe ou non-déterministe (aléatoire).

Le déploiement déterministe est utilisé dans les cas où les zones de couverture sont accessibles et peu étendues et la sélection des positions des capteurs est possible. Dans de telles conditions, l'emplacement de chaque nœud étant préétabli à l'avance, ce qui rend possible la détermination des rôles de chacun et aussi, en fonction des positions des nœuds il est possible de programmer de leurs interactions. Ce choix de déploiement s'avère être très contraignant pour les réseaux de grande dimension.

En effet, dans les milieux immenses ou hostiles les emplacements du grand nombre de nœuds capteurs ne peuvent pas être connus à l'avance, ce qui impose l'abandon de la méthode du déploiement déterministe au profit de celle du déploiement non déterministe aléatoire. Les nœuds, sont souvent largués dans ces zones de surveillance lors des processus de déploiement ou d'implémentation d'où, leurs positionnements aléatoires.

Néanmoins, pour tout design de WSN aussi perfectionné qu'il soit, les nœuds de capteurs qui le composent sont sujet aux défaillances après un certain temps d'opérations correspondantes à son activité ou simplement suite aux contraintes physiques ou naturelles auxquelles il est exposé. Ceci, causent par conséquent, des changements très fréquents de la topologie du réseau et qui pourra engendrer le besoin de redéploiement [71].

I.8.3. Réseaux de Capteurs Sans Fil et MANET

Les réseaux de capteurs sans fil représentent une particularité dans les réseaux Ad-hoc (Mobile Ad hoc NETWORKS (MANET)). L'examen des caractéristiques citées précédemment montrent qu'elles sont corrélées et non exhaustives. On observe par conséquent, quelques similitudes entre les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs sans fil concernant, l'utilisation d'un médium sans fil, le déploiement Ad Hoc, l'auto-organisation, le routage multi-sauts et la mobilité restreinte des nœuds. Conjointement, à leurs propriétés d'être adaptatifs et ayant la capacité d'interagir avec leurs environnements, les réseaux de nœuds de capteurs sans fil se différencient pourtant d'autres réseaux sans fil Ad-hoc.

Réseau de capteurs sans fil	Réseau Ad-hoc
Grande densité de nœuds (de l'ordre de milliers)	Nombre de nœud moyen, de l'ordre de cents.
Faible capacité de stockage des nœuds.	Grande capacité de stockage et de traitement des nœuds
Data-centric : les requêtes sont envoyées à tous les nœuds (Très grand nombre de nœuds n'ayant pas tous d'identifiant ID)	Adress-centric: les messages sont envoyés à une adresse particulière (tel que IP) propre à un nœud. (Notion d'identifiant)
Utilisation des communications en mode diffusion (broadcast). Les liaisons radios sont intrinsèquement omnidirectionnelle	Communication point à point
Flot de données « Many-to-one ».	Flot de données « Any-to-any ».
Facteur déterminant : l'énergie. Chaque nœud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable.	Facteur déterminant : le débit. La contrainte majeure étant la garantie d'une qualité de service
Les nœuds collaborent pour remplir un objectif commun.	Chaque nœud a son propre objectif.
Utilisation des protocoles de routage prenant en considération la conservation d'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau.	Plusieurs types de protocoles de routage peuvent être utilisés

Tableau 1.3: Réseaux de capteurs VS Réseaux Ad-Hoc

Sur le Tableau 1.3 on illustre une comparaison succincte qui montre quelques divergences entre les réseaux Ad-hoc et les réseaux de capteurs sans fil.

Les techniques développées pour les réseaux MANET sont utilisées dans la conception des WSN et en y joignant des configurations particulières prédéterminées (réseau redondant et collaboratif, tolérance aux erreurs, ainsi que d'autres caractéristiques des WSN) dédiées à la résolution du problème sujet de l'application mise en jeu.

La prise en compte de l'économie de l'énergie apparait bien comme une contrainte de très forte importance. C'est la problématique transversale et la plus récurrente dans l'exploitation des WSN, elle est extrêmement liée à tous les niveaux ; matériel et logiciel.

I.9. Domaines d'applications des réseaux de capteurs sans fil

La gamme d'applications des WSN est déjà très large et continue à se développer avec une cadence croissante. Le but ultime des WSN est de fournir des moyens de communication fiables à toutes les machines, appareils et objets existants, afin qu'ils puissent recevoir et envoyer des informations depuis et vers des points d'intérêt situés à des milliers de kilomètres de distance. L'intégration de capteurs dans de nombreux environnements a procuré d'énormes avantages sur des espaces très étendus et pour de longues périodes (Figure 1.9). Selon des études et des prévisions récentes du marché, plus de 50 milliards de nœuds de capteurs seront interconnectés en 2025, créant ainsi un marché de plus de 5 milliards de dollars [111].

La miniaturisation des nœuds de capteurs formant un WSN associée à leur faible coût a permis la conquête et l'intervention dans divers domaines. Ceci, du fait de leur capacité à intégrer de multiples fonctions avec une capacité de communication sans fil de courte portée [24].

Les WSN sont un sujet de recherche et développement largement partagé et ils incluent également d'autres applications de notre vie courante.

Ils peuvent contribuer à éviter les défaillances catastrophiques, préserver les ressources naturelles, augmenter la productivité, améliorer la sécurité, aider à la surveillance médicale et permettre de nouvelles applications telles que : l'administration des systèmes sensibles au contexte des technologies, la gestion et l'analyse de phénomènes complexes, création d'espaces intelligents ou autres.

Ci-après, on cite quelques champs d'applications des WSN :

- Applications dans des environnements et écosystèmes variés : les WSN permettent la surveillance et le relevé des changements climatiques pour pouvoir étudier entre autres les changements de certaines espèces animales ou végétales. Aussi, les WSN sont très utilisés en agriculture : taux d'humidité, composition du sol, Dans la prévention catastrophes naturelles telles que les feux de forêt, les inondations, l'éruption de volcans,...
- Applications de santé [50]: les WSN interviennent dans la surveillance médicale, l'élaboration de diagnostic de quelques maladies par croisement de données physiologiques, l'implantation de rétine artificielle ou de micro-caméras pour un suivi intra-corps humain,...



Figure 1.9 : Exemples d'applications WSN -impacts environnementaux, sociétaux et avantages financiers.

- Applications militaires : par actions de contrôle et de surveillance au niveau des zones frontalières. Les WSN sont également, utilisés dans la collecte des informations

détaillées sur l'ennemi, dans la détection des agents chimiques et bactériologiques et dans le suivi des objets mobiles intrus.

- Applications industrielles : Les WSN se sont remarquablement développés dans les milieux industriels sur une large échelle. Ils sont capables de contrôler et supporter plusieurs contraintes industrielles telles que celles liées à l'identification de la fatigue mécanique et la localisation de déformations des matériaux, la robustesse par rapport aux erreurs de transmission et notamment la contrainte du temps réel [28]. Les WSN sont aussi largement déployés dans les applications orientées maintenance prédictive telles que la prévision des pannes d'équipements, ...
- Applications de sécurité : L'introduction des WSN dans les besoins de sécurité des espaces divers a montré sa fiabilité (meilleure assurance et réduction des charges financières) à travers la sécurisation des êtres humains et des lieux notamment les milieux distribués. Les applications implantées dans les WSN se sont aussi distinguées dans le domaine de la domotique (bien-être et sécurité) et celui de la logistique au niveau de l'automatisation des transports, le suivi en temps réel du déplacement des marchandises et des stocks dans les entrepôts.
- Applications en commerce : l'intégration des WSN dans l'usage commercial au niveau des processus de stockage, de la traçabilité, de suivi de marchandises et de livraison en temps réel. Ce qui offre ainsi, une qualité de service à moindre coût.

Les applications des WSN peuvent être départagées selon deux catégories à savoir la surveillance à distance et le suivi d'emplacement d'objet mobile [4]. Sur la Figure 7 suivante est illustrée une vue d'ensemble montrant la subdivision en deux catégories des applications basées sur les WSN.

Les deux catégories de surveillance et de suivi à distance peuvent être aussi divisées en deux classes d'applications dont l'exploitation est fonctionnelle en milieux internes et externes.

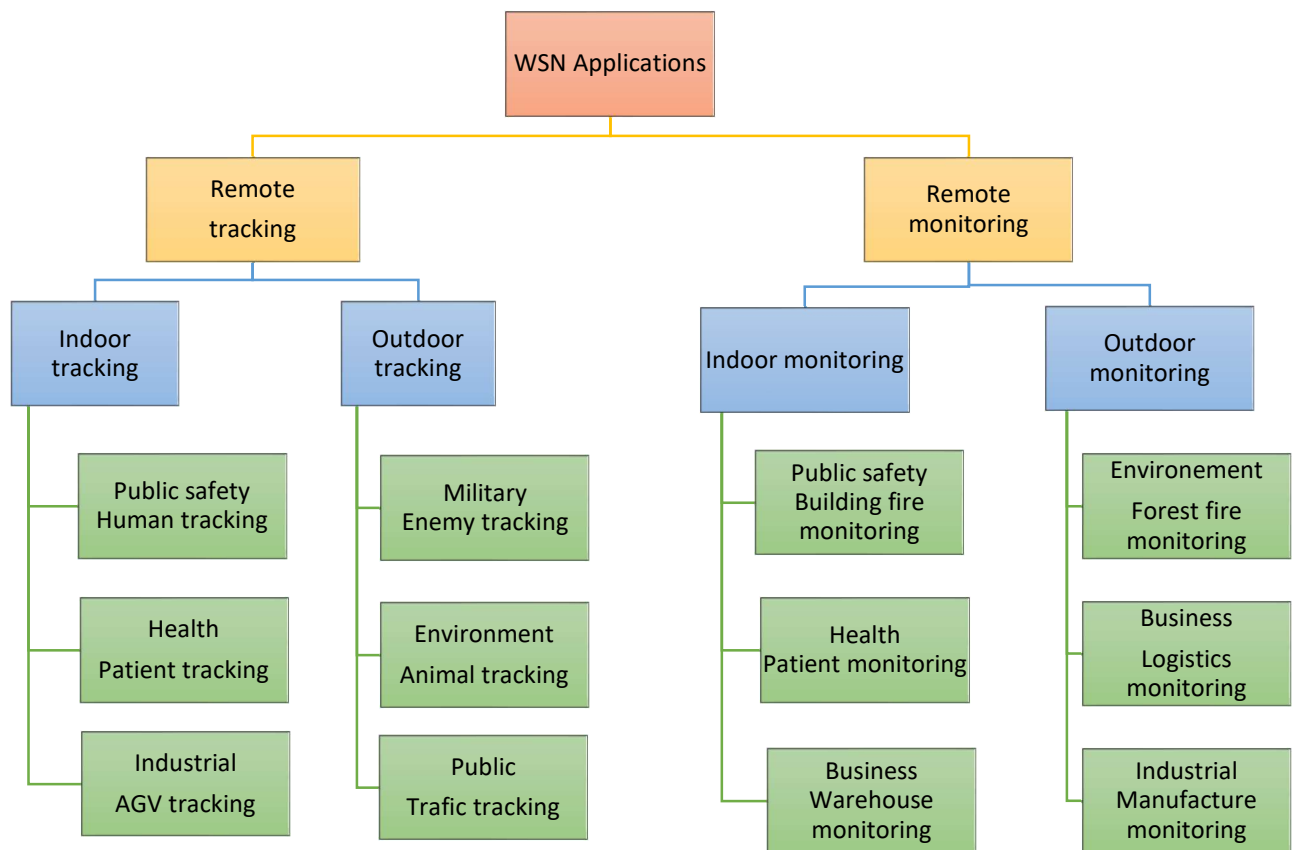


Figure 1.10 : Une vue d'ensemble des applications WSN [4]

Le caractère temps réel est évidemment mis en place lorsqu'il s'agit des applications de suivi d'emplacement d'objet mobile ce qui n'est une obligation au niveau de celles dédiées à la surveillance distante.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue l'état de l'art (technologies et problématiques) des WSN de façon générale. Ils sont décrits en tant, qu'un ensemble de petits nœuds de capteurs déployés en grand nombre dans des environnements [4], [17] très disparates.

Aussi, nous avons abordé quelques aspects et concepts des WSN à travers leur définition, leurs fonctionnements, le modèle protocolaire de communication adopté et leur contrainte majeure qui réside l'énergie des batteries et de la manière de sa consommation.

Les potentialités des réseaux de capteurs sans fil ont permis leur forte utilisation dans divers domaines et ont offert un large éventail d'applications dans l'industrie, la recherche scientifique, le transport, l'infrastructure civile et militaire, la sécurité, etc. Or, pour les différents besoins d'exploitation et de gestion de grandes quantités de données, lors de la détection d'information,

le traitement des données ou les transmissions de courte portée et vers la station de base on a décelé certaines problématiques au niveau des usages des WSN.

Plusieurs travaux de recherches se sont alors développés ces dernières années autour de l'optimisation des performances des WSN, à propos notamment des faibles ressources énergétiques disponibles dans l'ensemble du WSN. Ceci, est expliqué par le fait que les nœuds de capteurs sont alimentés par des batteries de petites dimensions, ce qui leur impose de fournir une quantité d'énergie finie et qui doit se maintenir plus longtemps, afin d'éviter l'épuisement précoce de leurs batteries. Ces batteries sont dans la plupart des cas non rechargeables.

Le chapitre suivant sera consacré en conséquence à l'élaboration du bilan de la consommation énergétique dans les WSN. Ce bilan renseigne sur la répartition énergétique dans un nœud de capteur. Aussi, nous présentons le modèle électrique de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil particulièrement au niveau du module RF (Radio Frequency) ainsi que, quelques propositions de techniques de conservation d'énergie.

MODELE DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

II.1.Introduction

Comme développé auparavant, dans les réseaux de capteurs sans fil l'efficacité énergétique et l'équilibrage de la charge énergétique sont les principales métriques d'intérêts majeurs. Il s'agit, concrètement d'étudier le meilleur compromis entre les différentes activités consommatrices d'énergie. En effet, l'autonomie fonctionnelle des réseaux de capteurs sans fil met en avant la distribution d'énergie et les formes de sa dissipation au sein d'un nœud puis, par projection au niveau du réseau en entier. Il est par ailleurs, important pour mieux appréhender ces réseaux d'examiner de point de vue technique, le management de ses ressources.

Le présent chapitre s'intéressera donc, à l'analyse des médias de transmission employés dans les WSN et aussi à la répartition et aux modes de la consommation énergétique d'un nœud capteur sans fil, lors de toutes les étapes de son activité de fonctionnement. Aussi, un intérêt particulier se veut inévitable et sera porté à l'utilisation du module radio d'un nœud.

II.2.Médias de transmission : Modèles de propagation radiofréquence

Dans les réseaux de capteurs sans fil les nœuds sont reliés par des médias de transmission sans liaisons filaires. Ces liaisons entre les nœuds sont en charge de toutes les émissions et réceptions de données et forment ainsi l'architecture sans fil du réseau. Les mediums sans fil généralement utilisés peuvent être des signaux de type optique, ultrason ou radiofréquence.

Or, souvent le problème d'interférences des signaux marque nettement la fiabilité des réseaux d'où, l'intérêt de favoriser le médium le plus convenable pouvant répondre aux besoins des applications pour offrir plus d'avantages au réseau, telles que l'auto-organisation qui permet d'assurer la communication même en situation de mobilité des nœuds.

L'utilisation des signaux optiques s'avère être non adéquate. Même s'ils sont capables de supporter la présence des interférences électriques, les signaux optiques sont pour autant bien influencés par les objets et les matériaux (problèmes de réflexion, d'interférences, de diffusion, de diffraction, etc) que par les sources de chaleur, de lumière ou du soleil ce qui dégrade la qualité du signal. Pour assurer les communications avec ce type de signaux, il faut être dans des environnements dégagés et les capteurs communicants doivent se situer dans les zones de perception et de communications des uns et des autres. En fait, il faut que la distance euclidienne entre deux nœuds soit plus petite que ou égale au minimum de leurs rayons de communication autrement dit, leurs portées.

De même, l'usage des signaux ultrasons pour les communications dans les réseaux de capteurs sans fil n'est pas très préconisé. Ce type de signaux présente des inconvénients tels que la nécessité d'avoir de faibles portées pour assurer l'arrivée sans pertes, le temps de réponse qui est long en comparaison avec les signaux radiofréquences, l'affaiblissement des signaux au niveau des destinataires, l'impact du type de milieu de déploiement du réseau, la température, la faible résistance aux interférences des autres signaux ultrasons ainsi que, le coût de la consommation d'énergie non satisfaisant.

Par ailleurs, concernant les signaux radiofréquences même s'ils peuvent être aussi interférer avec d'autres appareils électriques, ils sont généralement moins apprêtés à être bloqués. D'où, le choix du support de communication le plus retenu dans ce contexte qui est relatif à l'adoption des communications radiofréquences.

Si nous considérons uniquement les réseaux de capteurs sans fil à faible coût, à faible consommation d'énergie, à faible débit de données et à faible portée de communication, IEEE 802.15.4 sera le standard de communication le plus adéquat et le plus utilisé dans la conception de tels réseaux. ZigBee et 6LowPAN sont les deux protocoles de communication les plus largement adoptés et basés sur la norme IEEE 802.15.4.

La norme IEEE 802.15.4 définit le mécanisme permettant de réaliser les communications sans fil avec un débit binaire et une consommation d'énergie faibles. Techniquement, comme la norme IEEE 802.15.4 est axée sur le développement des couches physique et MAC, elle

convient principalement à la communication sans fil, plutôt qu'à une utilisation dans des applications réseau à grande échelle.

Le tableau 2.1 suivant décrit une comparaison extraite de la littérature scientifique [72] entre des technologies de communications sans fil standards.

Protocole	Bluetooth	UWB	ZigBee	WiFi	IEEE 802.15.6
Norme IEEE	802.15.1	802.15.3	802.15.4	802.11x	802.15.6
Nombre de Nœuds maximum	8	128	65000	32	256
Durée de Vie moyenne de la pile	Plusieurs jours	Plusieurs minutes	Plusieurs mois à plusieurs années	Plusieurs minutes à plusieurs heures	---
Débit Théorique maximum	Bluetooth Low Energy:1Mbit/s Bluetooth 3.0 + High Speed: 3-24 Mbit/s	110-480 Mbit/s	20 Kbit/s (EU), 40 Kbit/s (US) 250 Kbit/s (Global)	11-320 Mbit/s	10 Mbit/s
Bande de Fréquence	2.4 GHz	3.1-10.6 GHz	868 MHz (EU) 915 MHz (US) 2.4 GHz(Global)	2.4 GHz, 5 GHz	---
Portée Théorique maximum	10 m	<10 m	10-100 m	10-100 m	5-10 m
Consommation d'Énergie	100-200 mW	400 mW pour 200 Mbit/s	30 mW	750-2000 mW	Jusqu'à 50 mW

Tableau 2.1 : Comparaison entre différentes technologies sans fil standards

Il existe d'autres technologies de communications sans fil plus récentes qui sont propriétaires, telle que la technologie LoRa (pour Long Range) qui permet d'administrer des communications de longues distances et à débit bas variant entre 250 et 375000 bits/seconde donc à faible consommation. Ce qui peut à priori, garantir une durée de vie plus longue aux réseaux de capteurs sans fil.

Le protocole LoRa opère avec un mode de transmission en bande étroite. Les bandes de fréquences sont autour de 868 Mhz en Europe et ayant une distance de couverture qui varie entre 10 à 15 km en milieu rural et 2 à 5 km en milieu urbain avec un nombre de nœuds maximum d'environ de 10000 nœuds.

De manière général, malgré cela, le protocole LoRa n'a pas la capacité de gérer les collisions lors des transmissions simultanées de plusieurs nœuds en utilisant les mêmes paramètres tels que le canal, la puissance de transmission et le facteur d'étalement du signal (Spreading Factor

(SF)). Ceci, implique par conséquent la retransmission des données dans les réseaux en cas de collision et par la suite une surconsommation énergétique.

A partir de là, on constate que selon les services attendus du réseau et les besoins de son concepteur, le choix de telle technologie est défini. D'ailleurs, c'est ce qui fait que l'éventail des nœuds de capteurs développés et commercialisés soit très large.

II.3.Aspects consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Lors de la conception d'un environnement fonctionnel des WSN, il faut tenir compte des caractéristiques spécifiques de ces derniers, tout en prenant en considération le fait qu'ils doivent être un système autonome, à débit relativement "maximal" et à consommation d'énergie minimale et équilibrée entre tous les nœuds du réseau. En fait, les contraintes principales que confrontent les WSN concernent essentiellement l'efficacité énergétique puis la gestion des données qui est liée aux facteurs des échelles qualitative et quantitative des WSN, la bande passante et la puissance de traitement, la mémoire de stockage, la fiabilité et la sécurité des communications.

En vue, de concevoir un système de solutions énergétiques efficaces permettant de préserver au maximum la durée de vie d'un WSN, il est très important de procéder par analyser et identifier au préalable, l'emploi de celui-ci et les diverses sources qui engendrent la surconsommation de l'énergie dans ses nœuds de capteur. Ainsi, il sera plus concluant, de dégager le modèle le plus représentatif et efficace de la consommation d'énergie.

Le modèle doit être défini avec précision, afin de renseigner au mieux de la quantité d'énergie subsistante dans les nœuds de capteurs et par la suite permettre l'amélioration de la durée de vie du réseau. Dans les WSN, le bilan de la consommation énergétique est articulé autour des opérations suivantes : l'acquisition, le traitement et la transmission [36]. Et bien évidemment, à chaque opération est dédiée une quantité d'énergie correspondante.

On déduit alors l'expression détaillée suivante de la distribution de l'énergie totale E_{Total} :

$$E_{Total} = E_{Acquisition} + E_{Traitement} + E_{Transmission}$$

Le partage de l'énergie dans les WSN est influencé par d'autres facteurs de moindre importance mais, qui consomme aussi de l'énergie, tel que la retransmission suite aux collisions, l'écoute du canal, la sur-écoute, la surémission, l'échange des paquets de contrôle, etc.

II.3.1. Energie d'acquisition

Le bilan de la consommation d'énergie des nœuds dans l'unité d'acquisition concerne les opérations de la détection, la conversion analogique/numérique et le traitement du signal. L'énergie consommée dans cette unité dépend de la spécificité de la grandeur à mesurer, du type de capteur à utiliser ainsi que, la charge des tâches à exécuter. Dans cette unité la surconsommation peut être provoquée si par exemple la fréquence d'échantillonnage est mal contrôlée.

Dans plusieurs études [73], [74] on a constaté que la consommation d'énergie dans cette unité du nœud de capteur n'est pas très importante compte tenu de sa part dans l'énergie totale consommée.

II.3.2. Energie de traitement

Cette énergie est composée de l'énergie consommée dans l'unité de traitement lors de l'activation ou la désactivation du micro-processeur. L'activation de cette unité correspond à l'exécution du logiciel (lecture/écriture en mémoire, opérations de calcul,...). A celle-ci, s'ajoute une autre quantité d'énergie consommée pendant la durée de non activation de cette unité et qui correspond à l'énergie consommée pendant le mode veille, en plus de l'énergie de dissipation ou de fuite.

Là, aussi on note que l'énergie consommée par l'unité de traitement est faible par rapport à l'énergie totale consommée. Sur le tableau 2.2 on présente un exemple de la consommation d'énergie d'un nœud TelosB utilisant les microcontrôleurs de TI MSP430 [67], lors des modes configurés basse consommation.

Modes	CPU clock (MHz)	Courant mesuré	Datasheet current TelosB
L'unité de traitement étant activée	1	570 μ A	500 μ A-100 μ A
	4	2.25 mA	1.8 mA-2.4 mA
Seul le processeur étant désactivé	1	90 μ A	N/A
	4	4 180 μ A	N/A

Tableau 2.2 : Consommation d'énergie d'un nœud TelosB [67]

Sur la base d'un benchmarking (Tableau 2.3) de trois architectures matérielles à 3 volts et à une fréquence d'horloge de 1Mhz on a les caractéristiques électriques suivantes :

Architecture Matérielle	Régime actif	Sleep
Atmel AVR	< 2mA	8 μ A
Microchip PIC	< 0,7mA	1,2 μ A
Texas Instruments MSP430	0,7mA	< 1,2 μ A

Tableau 2.3 : Caractéristiques électriques des microcontrôleurs les plus utilisés

On en déduit que à travers les mesures dans les Tableaux 2.2 et 2.3 que chaque seuil peut fournir des informations précieuses sur la conservation d'énergie attendue dans l'unité de traitement grâce à une planification appropriée en mode basse consommation.

II.3.3. Energie de transmission

Cette énergie est consommée quand l'unité de transmission est activée soit en émission soit en réception. Elle représente la plus grande énergie consommée dans les nœuds de capteur. La dissipation de l'énergie attribuée à la transmission c'est-à-dire au fonctionnement du module radio notamment en émission de données est beaucoup plus élevée que celle au niveau des autres unités [73], [74]. Plusieurs travaux de recherche [9], [66] ont montré que l'énergie consommée par les composants radio dans la transmission d'un bit d'information est équivalente à celle mise en jeu pour l'exécution de plus d'un million d'instructions [81].

Le coût énergétique en réception est invariable, par contre celui relatif à l'émission dépend de plusieurs paramètres à savoir, la puissance d'émission du signal radio, la portée par rapport à la destination, la taille des donnée à transmettre, le débit binaire,...

La Figure 2.1 représente l'évolution du courant consommé lors de la transmission d'un message radio sur le nœud MICA2, ce qui indique par conséquent sur la consommation énergétique dans le nœud.

On en déduit, aussi l'intervalle de la variation du niveau de la consommation maximale atteinte dans le module radio lors de la transmission.

Également, pour le capteur Telos [67] qui intègre le microcontrôleur TI MSP430 et le module radio Chipcon CC2420, on a illustré sur le tableau 2.4 suivant, les valeurs des intensités de courants mesurées et qui correspondent au profil de la consommation d'énergie.

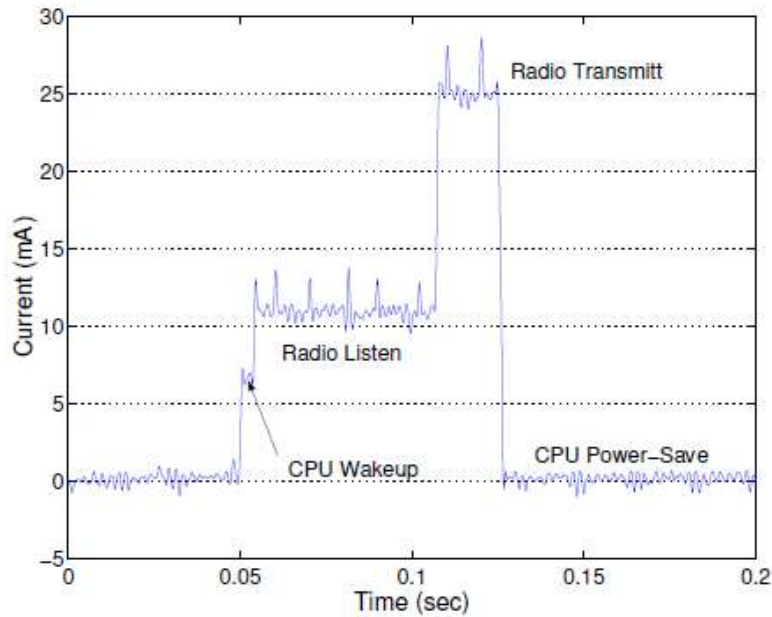


Figure 2.1 : Courant consommé lors de la transmission d'un message radio sur le nœud MICA2 [66]

L'analyse des mesures des intensités de ces courants montre, selon les différents états de fonctionnement des modules des nœuds capteurs, les niveaux des besoins en énergie et les variations de ceux-ci.

Il s'agit des opérations dans le module radio (réception, écoute, transmission), du mode de fonctionnement du CPU (activé ou désactivé) et de celui de la mémoire interne (lecture, écriture, effacement).

Module	Mode	Courant mesuré
Radio	Receive	22.8 mA
Radio	Transmit (0 dB)	21.7 mA
Radio	Transmit (-25 dB)	12.1 mA
Radio	Idle (-25 dB)	2.4 mA
Micro Controller	CPU active	2.33 mA
Micro Controller	CPU idle	2.25 mA
Internal Flash	Erase	1.35 mA
Internal Flash	Write	0.9 - 1.34 mA
Internal Flash	Read	0.68 mA
Micro Controller	CPU disable	1.80 μ A

Tableau 2.4 : Profil de la consommation d'énergie dans le capteur Telos [67]

Il est par ailleurs, évalué dans la littérature [46], [77] que majoritairement, les importantes sources de surconsommation concernent : l'envoi des paquets de contrôle, les collisions et les retransmissions, la perte de la connectivité dans le réseau (le besoin d'auto-organiser le réseau), la survenue du phénomène d'autodécharge intempestive des piles ou l'idle listening (l'écoute à vide). On rencontre aussi, dans ce même contexte le phénomène de l'overhearing c'est lorsqu'un nœud reçoit des données qui ne lui sont pas destinées (l'écoute abusive) ou l'overmitting qui correspond à la non disponibilité d'un nœud pour recevoir des données qui lui sont destinées.

II.4.Modèle de la consommation d'énergie

Comme la tâche principale et la plus couteuse en énergie dans les applications de WSN consiste à effectuer des communications sans fil via l'émetteur-récepteur radio intégré, la modélisation de la consommation de l'énergie dans les nœuds de capteurs fait partie des sujets de modélisation les plus importants dans ceux-ci, afin de renseigner et d'évaluer la dissipation énergétique dans ces nœuds de capteurs. Il existe dans la littérature scientifique plusieurs recherches et propositions de modèles de la consommation d'énergie dans les WSN.

Or, vu que, c'est le module radio dans un nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, la plupart des modèles de la consommation énergétique se sont focalisés sur l'optimisation de la dissipation énergétique liée principalement aux transmissions.

A partir de la littérature scientifique, nous avons opté pour le modèle énergétique de référence qui a été proposé par W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan et H. Balakrishnan [9], [68]. Il s'agit d'un modèle très simple et largement utilisé dans la majorité des travaux de recherche relatifs à l'économie de la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil, ce qui a par conséquent, motivé notre choix pour celui-ci.

Ce modèle développé de la consommation énergétique dans le module radio dépend des énergies de transmission et de réception ainsi que, de la portée des nœuds. Cette dernière dépend implicitement de l'énergie instantanée et individuelle propre à chaque nœud.

En effet, dans le module radio l'émetteur consomme de l'énergie quand il fait fonctionner l'électronique de la radio et l'amplificateur de puissance pour l'émission. Alors qu'au niveau du récepteur la consommation d'énergie sert à faire fonctionner l'électronique de la radio pour la démodulation, le décodage des signaux reçus.

La Figure 2.2 suivante est une illustration du modèle de la dissipation de l'énergie dans le module radio d'un nœud de capteur.

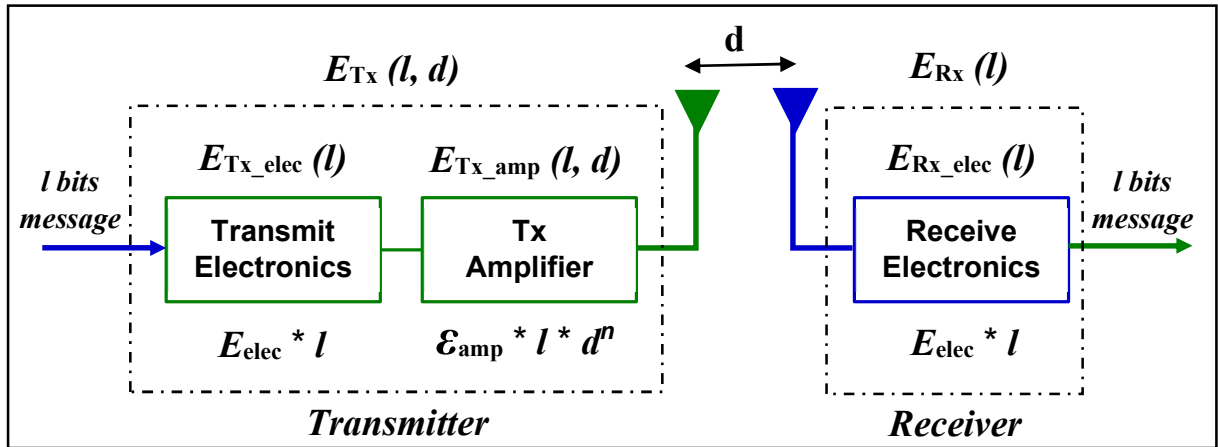


Figure 2.2 : Modèle de la dissipation de l'énergie dans le module radio d'un nœud de capteur [36], [68]

Cette énergie consommée “ E_C ” dans l'unité de la communication par le module radio est subdivisée en deux parties :

$$E_C = E_{Tx}(l, d) + E_{Rx}(l)$$

Avec :

- $E_{Tx}(l, d)$: Energie de transmission qui est destinée à chaque émission d'un message de (l -bits) sur une distance (d) donnée
- $E_{Rx}(l)$; Energie de réception qui est nécessaire pour recevoir un message de (l -bits)

Le modèle qui représente l'énergie consommée par un nœud de capteur pour émettre un message de (l -bits) sur une distance (d) (en m) donnée entre l'émetteur et le récepteur est exprimé par :

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-am}(l, d) \quad (A)$$

L'expression ci-dessus, possède une forme plus détaillée qui tient compte des éléments et des spécificités du contexte des nœuds de capteurs notamment les propriétés physiques du module radio ainsi que, de la quantité de données à communiquer et de la distance de transmission.

Selon la valeur seuil (d_0) de la distance qui sépare le nœud émetteur et celui récepteur on utilise soit le modèle de canal de propagation en espace libre qui présente une perte de puissance proportionnelle à (d^2) ou le modèle de canal de propagation à chemins multiples qui est caractérisé par un coefficient d'affaiblissement et enregistre une perte de puissance proportionnelle à (d^4).

Si la distance (d) entre les nœuds émetteurs et récepteurs est inférieure à un seuil (d_0), le modèle de propagation en espace libre (fs) est utilisé. Sinon, le modèle multi-path (mp) (multi-chemins) est utilisé, le modèle de consommation est alors différent puisque l'énergie nécessaire est plus importante.

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} l * E_{elec} + l * \varepsilon_{fs} * d^2 & \text{si } d < d_0 \quad n = 2 \\ l * E_{elec} + l * \varepsilon_{mp} * d^4 & \text{si } d \geq d_0 \quad n = 4 \end{cases} \quad (B)$$

Où :

E_{elec} : L'énergie électronique par bit, nécessaire pour activer les circuits électroniques du module radio au niveau des communications de l'émetteur et du récepteur

ε_{fs} : Energie consommée par l'amplificateur de l'émetteur lors de la propagation en espace libre (dissipation de l'antenne en "Friss free space", typiquement 100pJ/bit/m²)

ε_{mp} : Energie consommée par l'amplificateur de l'émetteur lors de la propagation dans un canal multi-chemin (dissipation de l'antenne en "two-ray" propagation, typiquement 15.10⁻⁴ pJ/bit/m⁴)

Et (d_0) étant la distance seuil de référence, qui permet de choisir soit le modèle de propagation "Friss free space" soit celui de "two-ray". Son l'expression est :

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}}$$

Comme montré sur la Figure 2.2, l'énergie électrique (E_{elec}) dépend de plusieurs facteurs tels que le codage numérique, la modulation, le filtrage et la propagation du signal, alors que les énergies de l'amplification : ($\epsilon_{fs} * d^2$) et ($\epsilon_{mp} * d^4$) dépendent de la distance par rapport au récepteur et du taux acceptable de l'erreur binaire.

Également, pour recevoir un message de l -bit, la radio du nœud récepteur dépense une quantité d'énergie E_{Rx} :

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-el} \quad (l) = l * E_{elec} \quad (C)$$

Il est à noter que très généralement, on suppose que le canal radio fonctionne de façon symétrique, autrement dit, le coût énergétique de transmission de message entre deux nœuds respectivement aux points A et B est le même lorsque la transmission est effectuée dans l'autre sens de B vers A.

Le tableau 2.5 suivant présente quelques caractéristiques du module radio [9], [68] :

Opération	Symbole	Energie dissipée
Energie consommée par l'amplificateur pour les transmissions (Modèle d'espace libre de l'amplificateur de l'émetteur)	ϵ_{fs}	100 pJ/bit/m ²
Energie consommée par l'amplificateur pour les transmissions (Modèle multi-path de l'amplificateur de l'émetteur)	ϵ_{mp}	0,0013 pJ/bit/m ⁴
L'énergie consommée pour activer les circuits électroniques du module radio (modulation, démodulation, codage, décodage,) lors des communications au niveau de l'émetteur et du récepteur	E_{elec}	50 nJ/bit
L'énergie consommée pour l'agrégation des données	E_{DA}	5 nJ/bit/signal

Tableau 2.5 : Paramètres du module radio [9], [68]

Le modèle de l'énergie consommée par un nœud de capteur comme décrit auparavant correspond à la dissipation énergétique dans le module radio. Il ne tient compte que des circuits

du transmetteur, du récepteur et de l'amplificateur. Ce modèle prend en considération la charge énergétique dissipée lors du fonctionnement en transmission et réception des données. Ceci, puisque c'est au niveau de l'émetteur-récepteur que la majorité de l'énergie est dissipée.

Comme évoqué dans le chapitre précédent, les communications dans les WSN sont gérées par un modèle en couche. De ce fait, les données échangées sont découpées en paquets et au niveau des WSN, il existe usuellement, deux sortes de paquets. Des paquets de données qui contiennent les mesures capturées par les nœuds et des paquets de contrôle dont le rôle est d'assurer et de maintenir certaines fonctionnalités du réseau par le biais l'échange de messages de signalisation entre les nœuds capteurs. En plus, à partir des équations (B) et (C), on observe que les énergies de transmission et de réception dépendent, aussi bien de la distance (d) entre les nœuds (émetteur et récepteur) que de la taille (l) des paquets (la longueur des messages).

Il est donc évident qu'afin d'éviter les pertes d'énergie dans les nœuds de capteurs et de veiller pour une optimisation de la consommation d'énergie dans tout le réseau, il faut mener des actions de diminution de la distance (d) et de la taille des paquets (l). Ceci, passe concrètement, par un choix judicieux du protocole de routage à adopter qui est foncièrement dépendant du contexte et des attentes d'applications pour lesquels le réseau est dédié.

II.5. Techniques de conservation d'énergie

Le contexte et le paradigme des WSN font que la consommation énergétique est une métrique d'évaluation extrêmement très importante et le coût énergétique alloué à la manière de fonctionnement des applications pour lesquelles un WSN est déployé influence amplement sa durée de vie.

Il est par conséquent, évident que la prise en compte de la problématique de l'efficacité énergétique se veut une contrainte transversale à toutes les parties qui forment un WSN à savoir le matériel, les protocoles de communication, les logiciels implémentés et les applicatifs. Ceci, justifie le besoin de revaloriser les différents aspects de ces éléments en vue de conserver l'énergie globale du réseau le plus longtemps possible pour prolonger sa durée de vie. Les actions proposées pour la conservation de l'énergie dans les WSN se sont développées dès la couche physique en passant par les techniques de modulation jusqu'au la couche application et le développement de logiciels dédiés

Il existe une vaste diversité de mécanismes matériels et logiciels proposés et qui sont en arrangement continu pour la réduction de la consommation d'énergie dans les WSN. Dans

l'approche orientée technologie matérielle, on rencontre des mécanismes contrôlés par le logiciel et engendrant les modes faible consommation, tels que ceux qui minimisent l'activité électrique des circuits en coupant ses différentes horloges et en désactivant les périphériques dans l'unité de traitement ce qui les engage dans des périodes d'inactivité. Durant ces périodes de veille le processeur attend une interruption pour réagir aux stimuli générés par son environnement (capteur, radio, récupération d'énergie, etc.). Il existe aussi, d'autres mécanismes qui utilisent l'adaptation dynamique des tensions d'alimentation (DVS) pour modifier la fréquence de fonctionnement en fonction des besoins de l'application mise en jeu.

Toutefois, le partitionnement matériel-logiciel engendre aussi un coût énergétique lié à celui nécessaire à la synchronisation entre le matériel et le logiciel. Pratiquement, la conservation de l'énergie globale dans les WSN sollicite des actions d'optimisation au niveau de la technologie physique des nœuds, des algorithmes d'accès au canal radio, des algorithmes de routage des messages (données), de l'organisation du réseau pour permettre sa scalabilité et dans l'applicatif par le biais d'un traitement local des données recueillies avant la transmission à la station de base.

De manière générale, à partir des bilans ci-dessus, relatifs à la répartition de la consommation d'énergie contenue dans les batteries des nœuds, plusieurs techniques de conservation d'énergie ont été suggérées. Ces techniques concernent toutes les unités composant un nœud de capteur. Une représentation généraliste et simplifiée de ces techniques [73], [74], [76], [80] est illustrée sur la Figure 2.3.

Nous observons à partir de cette vue globale que la consommation de l'énergie d'un nœud capteur concerne principalement ses unités d'acquisition, de traitement et de transmission. Plusieurs approches ont été alors développées et suggérées afin, de réduire la consommation énergétique globale du réseau.

Par rapport à l'unité d'acquisition des données le coût énergétique engagé lors de son fonctionnement dépend bien évidemment du type du capteur et de la nature de la donnée. Pour les grandeurs physiques scalaires le codage peut se contenter de 2 à 3 octets. Par contre dans le cas de la détection de la voix ou de l'image le codage est représenté par plus d'octets. Une image est codée par plusieurs milliers d'octets, à titre d'exemple il faut 16384 octets pour une image de taille 128×128 codée sur 8 bits par pixel. L'énergie consommée peut être limitée en

réduisant les fréquences d'échantillonnage et les durées de captures ou par le biais des techniques basées sur la prévision des données à partir de relevés antérieurs

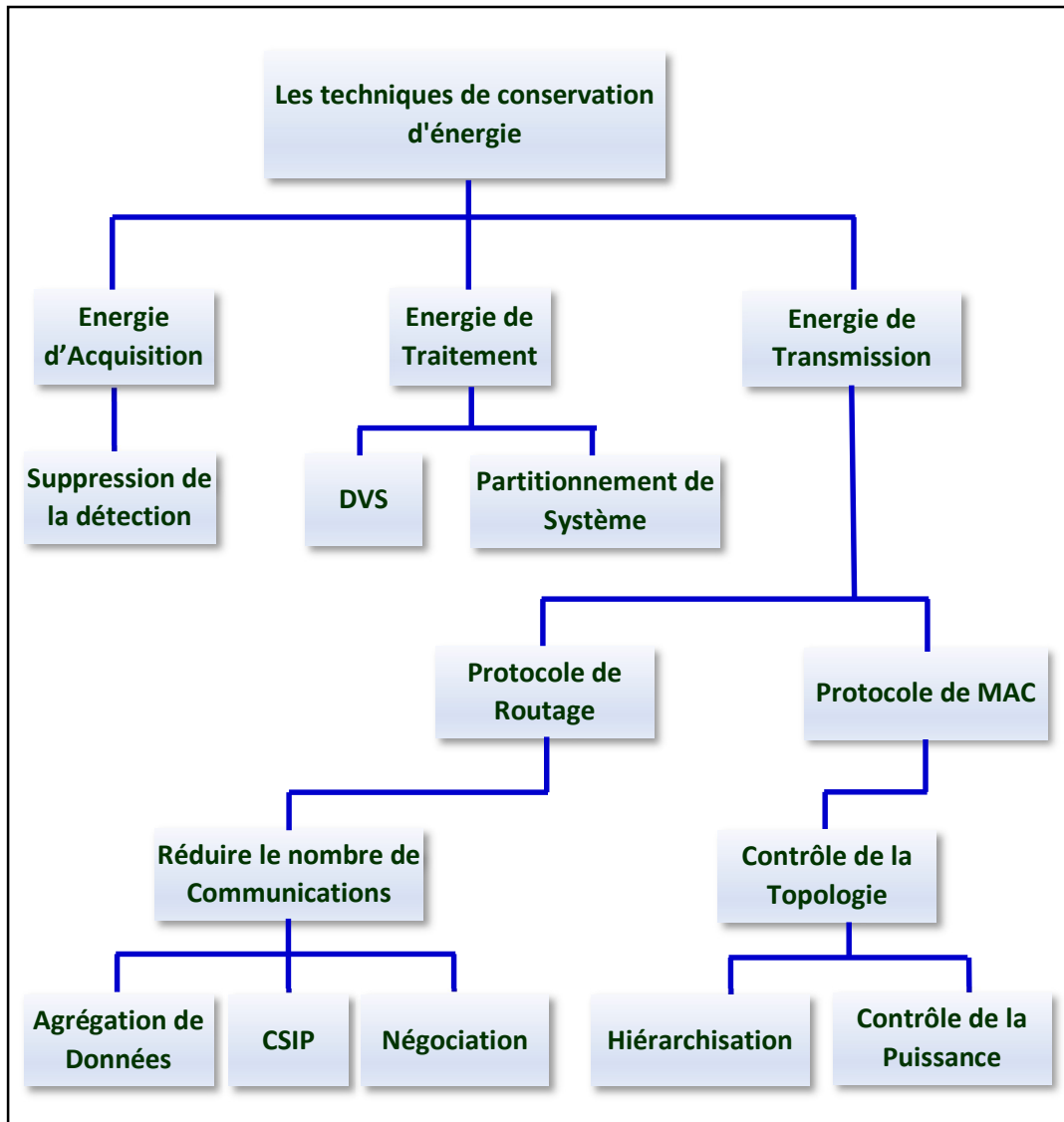


Figure 2.3 : Une vue globale des techniques proposées pour la conservation d'énergie

Au niveau de l'unité de traitement [69], [73], [74], l'énergie mise en jeu peut être diminuée en utilisant des mécanismes servant à ajuster dynamiquement les tensions d'alimentation (DVS) et à adapter la fréquence du microprocesseur, afin de limiter sa puissance générée pour les calculs. Aussi, il existe une autre approche dite de partitionnement de système à adopter dans cette unité et dont le but est de transférer les calculs et traitements des données vers une station de base dont les contraintes ne sont pas aussi imposantes par rapport aux nœuds. Mais, cette dernière approche se veut peu recommander puisqu'elle engage une activité de communication plus accru en transmettant plus de paquet de données [35]. Si l'application et la technologie des

nœuds de capteurs le permettent, il est plus avantageux de traiter les données localement pour réduire le volume de trafic et d'utiliser des techniques adéquates de communication ainsi que le routage multi-hop pour réduire les coûts énergétiques.

Dans l'unité de transmission, la réduction du nombre d'émission/réception des messages en vue de l'optimisation de la consommation de l'énergie est conditionnée par les protocoles développés pour la couche réseau et la sous-couche MAC. Les techniques utilisées dans ces protocoles se basent entre autres sur la technique CSIP (Collaborative Signal and Information Processing) qui intègre plusieurs fonctionnalités telle que : la tolérance aux fautes, le traitement de signal, la communication et le calcul à basse puissance, les systèmes adaptatifs, la théorie de fusion des capteurs et des décisions, les algorithmes distribués, l'agrégation de données ou la négociation. On trouve aussi, d'autres méthodes telles que celles qui reposent sur le contrôle de la topologie à travers, la hiérarchisation ou le contrôle de la puissance.

Or, puisque la grande partie de l'énergie fournies par les batteries des nœuds est consommée au niveau de l'unité de transmission, nous avons jugé que notre travail doit se focaliser sur l'optimisation des protocoles de routage. Ceci, à travers un intérêt particulier que nous avons mené sur ceux-ci, en vue de montrer l'impact d'une bonne sélection d'algorithme de routage dans la maximisation de la durée de vie des WSN.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes focalisés sur les problématiques énergétiques sur lesquels s'articule l'essentiel de nos travaux de recherches, en passant en revue le modèle de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil et plus particulièrement le contexte du module RF notamment les limitations des composants radio.

Nous avons rappelé quelques médias de transmission proposés dans les applications de WSN ainsi que, le modèle le plus souvent retenu à savoir celui basé sur la propagation radiofréquence. Aussi, nous avons jugé qu'il est judicieux de procéder au préalable à l'identification de sources consommatrices d'énergie et d'introduire le modèle à adopter pour représenter la consommation d'énergie dans les WSN de façon plus adéquate. Ensuite, nous avons dévoilé quelques techniques suggérées pour la conservation d'énergie.

A partir de l'analyse effectuée dans ce chapitre, on a constaté que l'action sur le routage dans les WSN serait en effet, une approche très intéressante pour l'optimisation et la préservation de la durée de vie des nœuds de capteurs. C'est dans ce sens que nos contributions se sont orientées.

Dans le chapitre suivant, un regard succinct descriptif sera porté à la notion de durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, on traitera plus explicitement l'impact des protocoles de routages sur les performances des réseaux de capteurs sans fil, pour une gestion effective de l'énergie et une prise en compte des solutions d'optimisation de sa consommation.

LES PROTOCOLES DE ROUTAGE ET LA DUREE DE VIE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

III.1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont des systèmes pour lesquels l'efficacité énergétique [39], [48] est une condition de base fondamentale imposée lors de leur conception, puisqu'elle affecte directement leurs durées de vie. En plus, l'estimation de la consommation énergétique globale au niveau du réseau en entier est sans doute une étape indispensable pour l'optimisation de sa durée de vie.

Pour estimer la consommation énergétique dans les WSN, il faut prendre en considération la hiérarchie systémique à savoir le système "réseau" et le système "nœud de capteurs". La corrélation entre les systèmes "réseau" et "nœud de capteurs" n'exclut pas l'importante différenciation entre les deux dans la mesure où les façons de leurs modélisations sont très distinctes [95]. En effet, la consommation d'énergie au niveau des communications représente la majeure partie dans l'échelle de la consommation totale d'énergie [40] des WSN. Par conséquent, la conception de protocoles de routage économes en énergie [41], [42] est inéluctable pour contribuer à la prolongation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil. Un protocole de routage est un algorithme conçu et envisagé pour trouver un chemin de transmission des données d'un nœud source à un nœud de destination. Le routage est un mécanisme dédié pour permettre d'optimiser les niveaux énergétiques lors des transmissions de données dans les WSN. L'élaboration de bonnes routes moins énergivores pour l'acheminement des données vers la station de base passe aussi par le bon choix des nœuds

relais, ce qui permettra l'optimisation de l'utilisation de l'énergie de transmission et par conséquent l'équilibrage des charges dans l'ensemble du réseau.

Nous introduisons ce chapitre par un aperçu de l'ambiguïté dans la définition de la notion de la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil. Ensuite, nous présentons à partir de la littérature scientifique le but de ce chapitre à travers la description de l'état de l'art de quelques protocoles de routage utilisés pour l'économie d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil ainsi qu'une variante de leurs diverses catégorisations.

III.2. La durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil

La notion de la durée de vie d'un WSN est une mesure très importante dans les environnements de ce type de réseau à ressources limitées. C'est une métrique de performance très dominante, elle est liée à la durée de vie individuelle de chacun des nœuds qui le compose. De même, la vie nodale qui correspond à la durée de vie d'un nœud dépend de celle de sa propre batterie. La vie de cette dernière est rattachée à sa technologie, à son énergie initiale dont la capacité est très souvent ne dépasse pas quelques joules, aussi aux énergies consommées par les différents modules composant le nœud et plus particulièrement, de la manière de son utilisation durant les différents états d'activité du nœud (en transmission, réception, écoute ou sommeil) jusqu'à son épuisement.

Le mode de l'exploitation de la puissance fournie par les batteries des nœuds capteurs peut aussi, être associé à leurs positions dans le réseau, à la quantité des données qui transitent dans le réseau et notamment aux protocoles de routage mis en place.

En générale, vu le contexte des WSN, la définition de la durée de vie d'un WSN correspondrait au maximum de temps écoulé [102] depuis son déploiement et durant lequel, le réseau est capable de maintenir un niveau opérationnel d'activité assurant la couverture et la connectivité afin d'accomplir son objectif. De cette définition, il convient de noter qu'elle est très générique, de par son expression très approximée et ambiguë.

Dans la littérature dédiée aux WSN plusieurs définitions de la durée de vie ont été proposées. Parmi ces définitions, on peut citer quelques-unes :

- La durée de vie basée sur la α -couverture : c'est une mesure qui peut être associée à la répartition spatiale des nœuds dans la zone de couverture et à la redondance produite par celle-ci. La durée de vie représente l'intervalle de temps cumulé depuis l'activation du réseau jusqu'à, ce que la couverture des nœuds devient en dessous d'un seuil α prédéfini ou lorsqu'une portion α de la zone d'intérêt soit couverte par au moins un nœud. Une autre variante prescrit plus le paramètre de redondance et impose dans ce

cas, à ce que chaque point de la zone déployée soit couvert par au moins k nœuds c'est ce qu'on appelle la k -couverture

- La durée de vie basée sur la connectivité : dans les WSN ce qui importe de point de vue connectivité celle assurée par le réseau en destination vers la station de base. Dans cette définition la connectivité dans les WSN est déterminée par le pourcentage de nœuds ayant des chemins vers la station de base. Ceci, prescrit par conséquent la durée de vie du réseau comme étant la durée pour laquelle, ce pourcentage de nœuds possède un chemin vers la station de base. Cette mesure est effectuée à travers le relevé du taux de message délivré à la station de base.
- La durée de vie basée sur le nombre de nœuds opérationnels aussi dits vivants : l'enjeu mis en évidence dans cette définition est relatif à la période de temps écoulée jusqu'à ce qu'une fraction de nœuds dans le réseau épuise son énergie. Les auteurs ont observé dans cette catégorie les nœuds défaillants pour distinguer plusieurs variantes, telles que celles dont la description de la durée de vie du réseau correspond à la durée jusqu'à ce que tous les nœuds ou uniquement, lorsque le premier nœud ou le premier Cluster Head épuisent toute leurs énergies. Aussi, on a défini la durée de vie par considérer la durée jusqu'à ce qu'il ne reste qu'une portion β de nœuds vivant dans le réseau. Dans certain cas, on parle de la demi-vie du réseau pour exprimer la durée atteinte lorsque β vaut 50% ce qui signifie que 50% des nœuds ont épuisé leurs batteries.
- La durée de vie basée sur les paramètres pour la qualité de service : compte tenu des exigences des applications on a défini dans certains travaux, la durée de vie du réseau par la durée pour laquelle le réseau est capable de fournir de point de vue quantitatif et qualitatif un taux acceptable de détection d'évènements. D'autres définitions, ont imposé selon les besoins des applications la satisfaction de certaines métriques telles que la fiabilité et la robustesse.

La lecture de ces définitions indique d'une part que la durée de vie des WSN se manifeste comme un critère critique qui doit être optimisé. D'autres part, l'interprétation de ces définitions montre qu'elles sont fondées sur des spécificités et métriques particulières liées aux réseaux et aux fonctionnalités désirées des applications [107], [108].

III.3. Routage et optimisation de la consommation énergétique

Dans plusieurs études, on a montré que la consommation d'énergie par chacun des nœuds d'un réseau de capteurs sans fil est tributaire de la coopération [75], [77], [105] entre ses composants

software et hardware. Il a été déduit par conséquent que, lorsque le module radio d'un nœud implémente le protocole de la communication dans le fonctionnement de sa partie hard, ceci, collabore à la réduction de la dissipation de son énergie [66].

La portée des nœuds étant faible, on a donc besoin de la coopération de ceux-ci, car la station de base peut ne pas être dans leurs portées pour diverses raisons telles que leur forte densité ou la répartition du réseau en plusieurs zones [75]. Ainsi, pour l'amélioration des performances des réseaux, le passage par le routage est considéré parmi les solutions intéressantes proposées puisqu'elles impliquent une collaboration intelligente des nœuds.

En effet, les performances des réseaux de capteurs sans fil dépendent de leurs caractéristiques les plus fondamentales. De ce fait, la fonction du routage dans les WSN est aussi tributaire de certaines de leurs contraintes spécifiques comme décrit ci-dessous :

- L'un des principaux objectifs des protocoles de routage dans les WSN consiste à préserver l'énergie en assurant, un routage optimal dans le but de réduire la charge du réseau. Ce qui diffère des autres réseaux conventionnels dont les protocoles de routage sont conçus pour atteindre une qualité de service (QoS) élevée lors du transfert de données.
- Les nœuds de capteurs sans fil présentent de nombreuses limitations, telles qu'une alimentation de batterie limitée, une taille de mémoire limitée, une capacité de calcul limitée et une bande passante aussi limitée
- Un WSN peut contenir un très grand nombre de nœuds de capteur. De ce fait, l'utilisation d'un adressage d'identification globale pour accéder à chaque nœud individuel peut s'avérer irréalisable.
- Un WSN est déployé pour différents besoins d'applications. Ce qui fait que sa conception doit être spécifique à l'application mise en place.
- Un protocole de routage devrait être aussi capable d'éliminer la redondance des données détectées, ce qui se produit lorsque des nœuds de capteurs détectent un même événement au même moment (la synchronisation dans l'activité des nœuds du réseau). Le contrôle pré-transmission des paquets de données et l'agrégation de données sont nécessaires pour réduire la redondance, en introduisant la suppression des doublons, la fusion de données, ...
- Les nœuds de capteur dans les WSN sont plus exposés aux erreurs ou aux pannes, en raison de leur petite taille comportant plusieurs technologies (la faible quantité de

mémoire dédiée au stockage des données, systèmes embarqués, GPS, ...) et aussi du modèle de l'activité de leurs batteries. Le protocole de routage devrait donc fonctionner efficacement, même en cas de défaillance de nœuds dans les réseaux (passage à l'échelle pour le maintien de l'évolutivité du réseau). Cette fonctionnalité de tolérance aux pannes nécessite que le protocole de routage ait la capacité de surmonter toute défaillance du réseau en découvrant et en maintenant de nouvelles routes pour la transmission de données en particulier, lorsqu'il s'agit d'application de temps réel, soumises à la contrainte de temps (déterministe).

- Les schémas de routage pour l'acheminement des données doivent aussi prendre en considération la répartition de l'énergie globale dont dispose tous les nœuds ainsi que, le temps de latence relatif aux périodes de traitements allouées à l'ensemble des opérations convenues dans le réseau.

Or, vu que la grande partie de l'énergie dans les WSN est consommée lors de la communication des efforts de recherches sont et doivent donc être menés à ce niveau. Dans cette thèse nous abordons les démarches du routage qui doivent être capable de s'adapter aux critères de performances de réseaux WSN et de garantir une durée de vie maximale aux objectifs des applications mises en place.

Dans le chapitre précédent, les équations (A), (B) et (C) présentent le modèle de la consommation énergétique adopté. On a décrit $E_{Tx}(l, d)$ comme l'énergie dépensée durant l'émission d'un message de (l -bits) sur une distance (d) (en m) entre les nœuds émetteurs et récepteurs, dont l'expression est :

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

Et plus en détails on a :

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} l * E_{elec} + l * \epsilon_{fs} * d^2 & \text{si } d < d_0 \quad n = 2 \\ l * E_{elec} + l * \epsilon_{mp} * d^4 & \text{si } d \geq d_0 \quad n = 4 \end{cases} \quad (B)$$

Puis on a " $E_{Rx}(l, d)$ " qui correspond à l'énergie de réception d'un message de (l -bits). Elle est donnée par :

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = l * E_{elec} \quad (C)$$

Ces équations, montrent clairement que la gestion de la distance (d) entre les nœuds (émetteur et récepteur) et de la taille (l) des paquets (autrement dit, la longueur des messages) jouent un rôle très important dans la conservation de l'énergie des batteries des nœuds. Ceci, étant plus particulièrement, mis en évidence lors de l'acheminement des données vers la station de base (ou l'utilisateur final). Quand le signal a une grande portée, la puissance d'émission sera élevée et l'énergie consommée sera aussi plus élevée. De même, lorsque la taille des paquets à transmettre est importante l'énergie mise en jeu pour la transmission est pareillement importante.

A partir de là, si on souhaite minimiser la consommation de l'énergie dans les WSN en agissant simplement sur la variation des dimensions de la distance (d) et/ou la taille (l) des paquets, un compromis raisonnable aboutissant à l'objectif souhaité ne pourra pas être vérifié, que ce soit pour une topologie fixe ou variable du réseau.

En effet, lorsqu'on diminue la longueur (l) des paquets le nombre de message à envoyer sera élevé, en plus, du nombre excessif de paquets de contrôle généré qui aura pour effet l'augmentation de l'overhead. Ceci, entrainera par conséquent, un surcoût de la consommation énergétique. De même, si la longueur (l) des paquets est trop grande l'énergie engagée l'est aussi, de façon proportionnelle.

Également, si on opte pour la réduction de la distance (d) entre les nœuds (émetteur et récepteur), il faut alors prêter une attention particulière à la portée des nœuds qu'il faut choisir, puisque celle-ci, permet entre autres de renseigner sur la quantité d'énergie mise en jeu. Dans de telles conditions le réseau sera exposé à beaucoup d'interférences et par conséquent, les collisions seront éminentes et fréquentes. Cet état générera des retransmissions de paquets de données en provoquant ainsi, une augmentation inutile de la consommation d'énergie.

Par conséquent, l'action sur la distance (d) et la taille (l) aura un effet important sur la conservation de l'énergie dans les WSN à travers, un choix éclairé des protocoles de routage à mettre en place pour préserver une durée de vie maximale du réseau.

La Figure 3.1 présente l'évolution de la consommation de l'énergie de transmission en fonction de la portée du signal pour le protocole Zigbee, pour deux longueurs de message (512 octets et

1024 octets). On constate donc, que l'augmentation de l'énergie de transmission est proportionnelle à la taille des paquets et à la portée du signal.

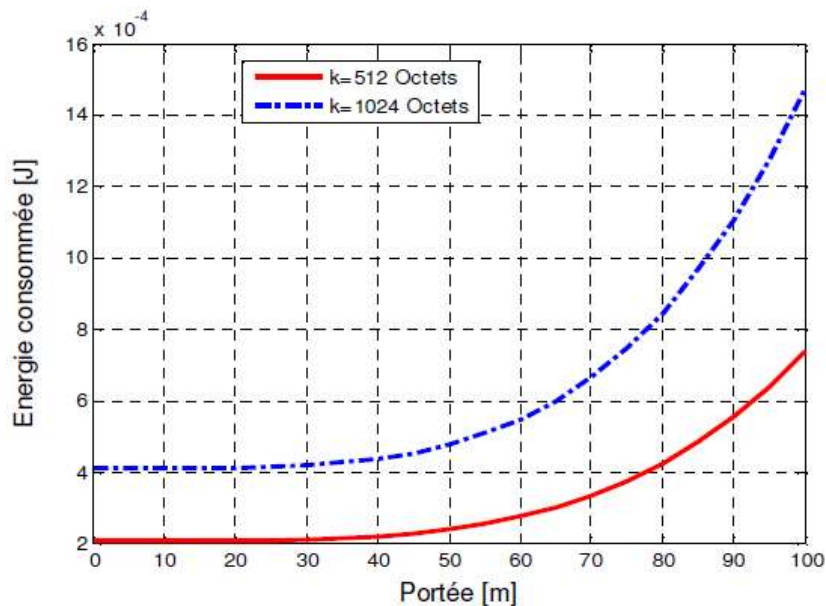


Figure 3.1 : Consommation de l'énergie (deux longueurs de message) en fonction de la portée du signal

Le besoin de développement de plus en plus d'applications a généré plusieurs problématiques de recherche qui sont nées ces dernières années. Les solutions proposées dans la plupart des cas s'intéressent aux protocoles de routage [75], [77], [105]. Ce qui promet le respect de l'autonomie du réseau qui parvient à offrir des services en s'autoconfigurant et en s'auto-coopérant directement sans l'intervention d'une quelconque partie.

III.4. Classification des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Par principe, dans les WSN la tâche principale d'un nœud de capteur consiste à détecter les données dans un environnement et à les acheminer à la station de base ou l'utilisateur final. Le choix du chemin de routage est très important et doit être correctement évalué.

Le problème du routage dans les WSN présente un défi très difficile qui peut être décrit comme l'accomplissement d'un compromis entre la réactivité et l'efficacité du réseau en entier. Ce compromis doit trouver un équilibre entre la nécessité de prendre en compte entre autres, les charges de traitement et de communications limitées dans les nœuds de capteurs.

Le routage peut dépendre aussi des choix de métriques qui doivent s'adapter aussi bien au contexte de l'application qu'à celui du réseau. On cite à titre d'information la métrique ETX

(EXpected Transmission Count) [96] qui permet de mesurer le nombre de transmission prévu pour transmettre un paquet entre deux nœuds A et B, et la métrique ETT (Expected Transmission Time) [97] qui correspond au temps nécessaire pour transmettre ce paquet, c'est la représentation temporelle de la métrique ETX.

La fonction de routage de l'information au sein d'un réseau WSN est assurée par tous ses nœuds. Ces derniers peuvent être des sources émettrices des données collectées ou/et des nœuds destinataires. La complexité du problème de routage dans les WSN relève essentiellement de l'absence d'infrastructure fixe et de toute administration centralisée en plus des autres défis caractéristiques. En effet, selon le contexte des besoins pour le déploiement d'un réseau WSN, et lors de la conception des protocoles de routage, il est important de prendre en compte les limitations en énergie et en ressources des nœuds du réseau, la qualité variable du canal sans fil, la possibilité de perte et de retard de paquet. Ceci, en plus, de tous les autres paramètres et limitations qui en découlent.

Pour répondre à ces exigences liées à la conception des réseaux de capteurs sans fil, plusieurs défis stratégiques au niveau du développement des protocoles de routage ont été proposés. Ceci, a amené par conséquent, à la création de diverses manières de découpages pour ces algorithmes de routage. Ils peuvent être classés, en protocoles de routage proactifs ou réactifs. Les algorithmes de routage proactifs déterminent les itinéraires d'acheminement de données captées avant qu'ils ne soient nécessaires et les mettent à jour, lorsque la topologie du réseau change. En revanche, les protocoles de routage réactifs procèdent à la découverte d'itinéraires à la demande.

Il existe de nombreuses autres manières de classer les protocoles de routage selon différents critères. Sur la Figure 3.2 est illustré un découpage basé sur la considération de deux catégories conceptuelles. C'est une taxonomie des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil qui repose sur la classification par type de protocole et la classification par structure ou architecture du réseau [4].

La classification par type de protocole [61], [93] engendre quatre sous-catégories de protocoles tandis, qu'au niveau de la classification selon la structure de réseau, on a trois sous-catégories comme représentées sur la Figure 3.2.

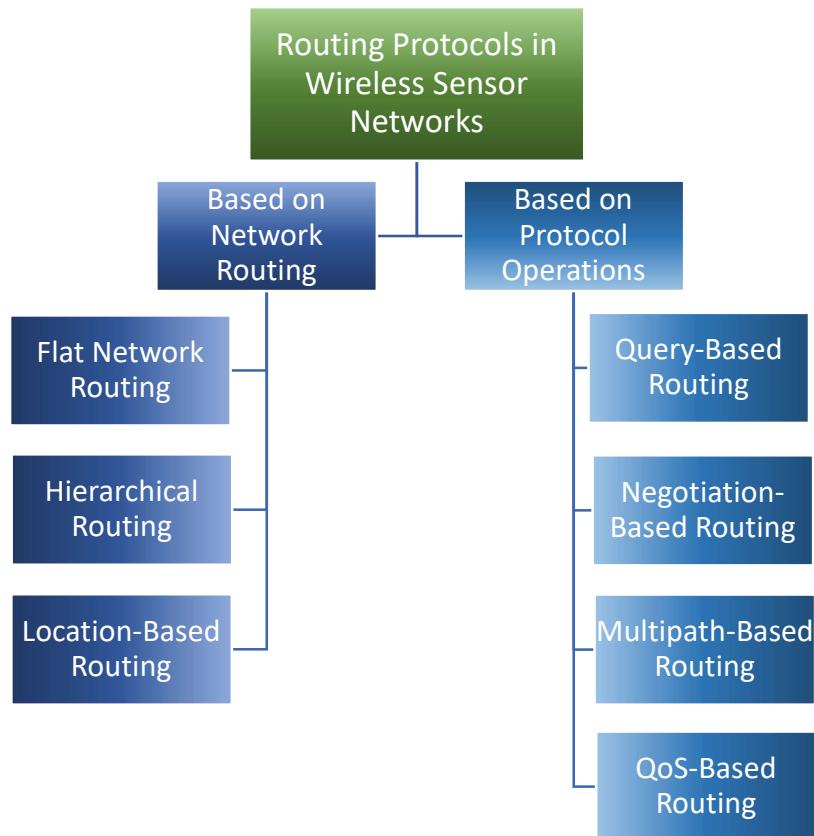


Figure 3.2 : Taxonomie des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil [4].

Ces catégories et sous-catégories ne sont pas mutuellement exclusives car certains protocoles de routage pourraient être classés dans plusieurs catégories et sous-catégories (catégorie hybride).

III.5. Classification par type du protocole

Les protocoles de routage appartenant à cette classe proposent des algorithmes de routage basés sur le critère fonctionnel concernant leur mode opérationnel.

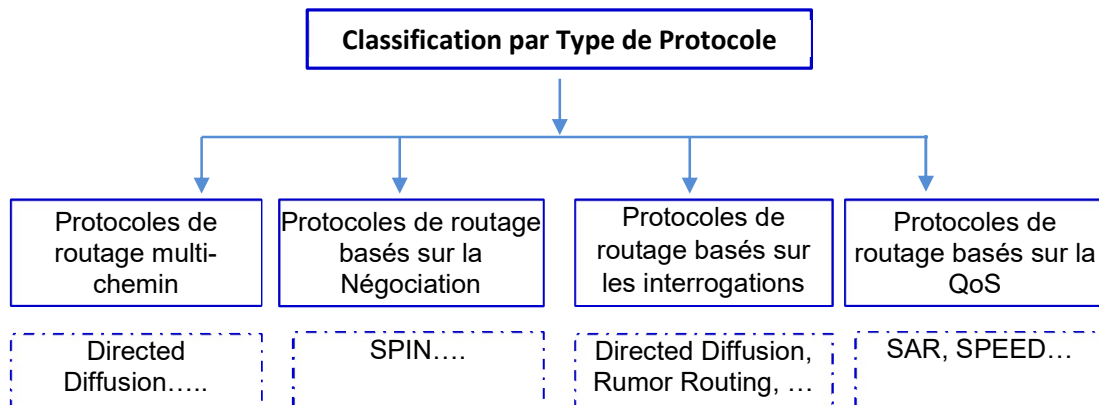


Figure 3.3 : Classification des protocoles de routage dans les WSN à base de type de protocole

On peut citer les protocoles de routage orientés multi-chemin, négociations, interrogations ou qualité de service (QoS). La Figure 3.3 représente cette catégorie de classification par type de protocole.

III.5.1. Protocoles de routage multi-chemins

Les protocoles de routage multi-chemins sont basés sur le principe d'utiliser plusieurs chemins pour atteindre la destination. Cette stratégie permet d'assurer des voies de réserves en cas de rupture du chemin principal. A titre d'exemple, les protocoles "Flooding" et "Gossiping" [94] qui adoptent ce concept de routage multi-chemins.

III.5.1.1- Flooding

Le "flooding" ou "inondation" est un protocole classique qui s'utilise pour le routage dans les WSN. Comme son nom l'indique, cette technique est basée sur le principe d'inonder le système par les données. Ainsi, une fois le paquet de données ou de contrôle est reçue par un nœud, ce dernier procède à sa diffusion vers tous les autres nœuds voisins jusqu'à ce qu'il atteinte sa destination ou bien avoir accompli le nombre maximal de sauts lui sont possibles.

L'avantage principal de cette technique d'inondation c'est qu'elle est réactive et moins coûteuse au niveau de la maintenance de la topologie du réseau, en plus de la simplicité de ses algorithmes conçus pour découvrir les chemins.

Par contre, on peut noter plusieurs inconvénients de cette technique, tels que :

- L'implosion : ce phénomène arrive lorsqu'un nœud reçoit des messages dupliqués [61]. Sur la Figure 3.4, on a le nœud D qui reçoit la même information de ses N nœuds voisins et qui sont aussi voisins du nœud A ayant émis l'information dupliquée N fois.

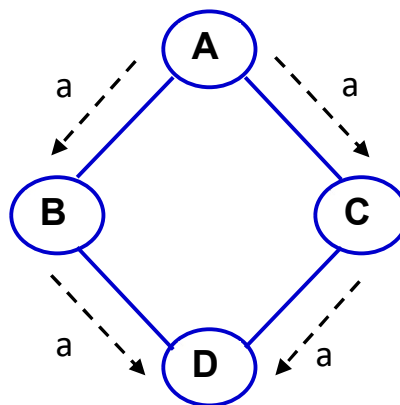


Figure 3.4 : Phénomène de l'implosion

Cette démultiplication de messages (copies) survient en cours de route quand les diffusions se multiplient via le nombre de nœuds intermédiaires.

- Le chevauchement : cette situation est observée quand plusieurs nœuds différents mais synchronisés, reçoivent la même information en même temps (redondance) et la diffusent vers leurs nœuds voisins qui vont recevoir des données dupliquées [61].

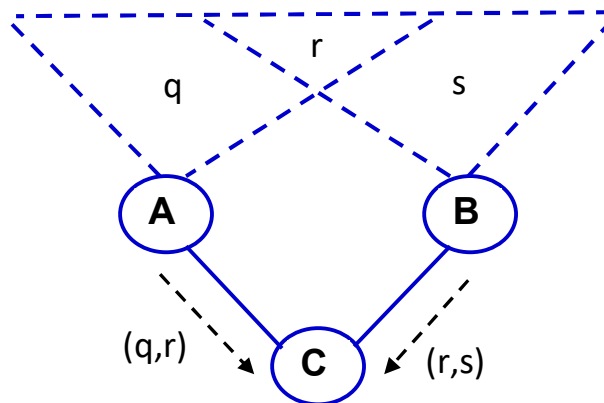


Figure 3.5. Phénomène de chevauchement

A titre d'exemple sur la Figure 3.5, le nœud C reçoit deux fois la même information communiquée séparément par les nœuds A et B vu que ces derniers ont un champ de couverture commun en amont.

Cette technique d'inondation ne prend pas en considération la préservation des ressources énergétiques disponibles dans le réseau, alors que tout protocole routage envisagé doit concevoir des chemins de routage utilisant une énergie moindre et distribuée sur l'ensemble des nœuds impliqués dans la transmission de la donnée, afin d'optimiser la durée de vie du réseau.

III.5.1.2 Gossiping

C'est une technique qui découle de celle de l'inondation à la différence que chaque nœud ne transmet le message qu'à un seul nœud voisin choisi aléatoirement. Ainsi, chaque nœud du réseau recevant des données, choisi aléatoirement un nœud parmi ses voisins et lui diffuse l'information reçue et ainsi de suite avec tous les nœuds.

Cette approche d'acheminement de données assure la diffusion d'une seule copie de message au niveau de chaque nœud et permet ainsi de palier aux problèmes de l'implosion. Toutefois, la durée de transmission est beaucoup plus longue pour relier les nœuds sources à la destination.

III.5.2. Protocoles de routages basés sur la négociation des données

Quand plusieurs nœuds de capteurs détectent un même événement, ils diffusent dans tout le réseau leurs paquets de données ce qui contribue à l'encombrement du réseau par des données redondantes. D'où, l'intérêt de déployer des protocoles de routage basés sur la technique de la négociation. Les nœuds capteurs négocient entre eux les données à transmettre ceci, via des échanges de paquets de contrôle spéciaux, appelés "Méta-DATA". En conséquence, cette approche permet de ne diffuser que la donnée unique en éliminant toute redondance inutile [75]. Nous pouvons citer comme exemple les protocoles SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation), qui font partie des protocoles adaptatifs.

La méthode opérée par ces protocoles est de scruter les données des nœuds et détecter celles redondantes au niveau du réseau de capteurs et ensuite ordonner aux nœuds de ne transmettre que les informations en exclusivité dans un point (non disponibles ailleurs).

Les algorithmes des protocoles SPIN sont conçus pour s'adapter aux situations de transferts de données. Ils prennent en considération l'énergie restante et procèdent par des négociations des données que possèdent les nœuds en utilisant les "Méta-Data" pour décrire les informations de ces données. Ceci permet essentiellement de palier aux problèmes des inondations des informations.

Le principe de fonctionnement des protocoles SPIN est basé sur deux concepts :

- Au lieu d'envoyer toutes les données qu'il possède, le nœud envoie uniquement une description succincte de ses données (Méta-Data).
- En permanence, les nœuds de capteurs contrôlent les changements dans leurs ressources énergétiques.

Pour réaliser la communication et le transfert de données, les protocoles SPIN passent progressivement par trois étapes [61] :

- Après avoir reçu des données et désirant les partager avec ses voisins, un nœud commence par diffuser un message ADV sous forme de Méta-Data. ADV étant utilisé pour annoncer de nouvelles données.
- Si un nœud voisin est intéressé par cette donnée, il réplique par un message REQ. REQ est utilisé pour demander des données

- Le processus est alors déclenché par le nœud qui commence à envoyer le message DATA contenant toutes les données à tous les nœuds voisins ayant répondu par un message REQ.

On rencontre plusieurs variantes de protocoles SPIN dont deux principales à savoir : SPIN-1 et SPIN-2. Le protocole SPIN-1 opère selon la démarche décrite plus haut.

Quant au protocole SPIN-2 qui est une extension du SPIN-1, il se charge en plus de surveiller les seuils d'énergie des nœuds. La participation d'un nœud dans l'exécution du protocole n'est considérée que s'il est estimé pouvoir effectuer les trois étapes du protocole (ADV, REQ, DATA) sans que son énergie descende en dessous d'un seuil prédéfini.

Par ailleurs, les protocoles SPIN présentent un inconvénient lié au fait que si un nœud n'est pas intéressé par une donnée, il constitue alors une barrière aux données ce qui affecte à ses voisins.

III.5.3. Protocoles de routage basés sur les interrogations

Dans ces protocoles, ce sont les nœuds puits qui envoient des interrogations pour entamer la collecte des données sur l'environnement du réseau et seuls les nœuds intéressés répondent. Les nœuds procèdent alors au routage (en émission ou en réception) de chaque paquet de donnée après avoir examiné son contenu.

Nous citons un exemple important de protocole dans cette catégorie à savoir le protocole de "Diffusion Dirigée" (Directed Diffusion (DD)). Son concept est élaboré autour de la diffusion d'une requête (appelée intérêt) [45] pour interroger l'ensemble du réseau sur une donnée particulière. Ce protocole s'appuie sur le modèle des paires "Attributs-Valeurs" (ou aussi appelé publish/subscribe) qui se réalise selon quatre phases : la propagation des intérêts, l'établissement des gradients, la propagation des données et le renforcement des chemins.

Pour les besoins de données, le puits diffuse dans tout le réseau l'intérêt qui décrit la donnée en utilisant l'inondation. Chaque nœud recevant un intérêt actualise son cache (un registre) d'intérêts composé de plusieurs entrées tels que l'estampille pour renseigner de l'instant de réception de l'intérêt, le gradient qui informe du nœud émetteur pour constituer la route inverse vers le puits, l'intervalle qui caractérise le débit des données et la durée qui est un champ indiquant la durée de vie de chaque entrée dans le cache. Une fois l'intérêt diffusé est reçu par un nœud, il le diffuse à son tour à son voisinage et l'enregistre dans son cache afin qu'il le compare avec ses propres informations captées. Lorsque, l'intérêt diffusé correspond aux

informations collectées par le nœud, ce dernier se transforme à un nœud source et entame l'envoi de ses données par le biais de ses gradients

Dès que, le nœud puit reçoit les premières données, il peut adapter la stratégie de routage à mettre en place par renforcer l'un de ses chemins et réguler le débit des détecteurs. Au cas où ce chemin est perdu, un nouveau chemin est établi. Ainsi, tous les nœuds ont la possibilité de réaliser une agrégation de données.

Contrairement aux protocoles "SPIN", la technique de la Diffusion Dirigée emploie un mécanisme d'interrogation généré par le nœud puit qui diffuse dans le réseau via la méthode d'inondation un intérêt pour interrogation de ses nœuds sur la disponibilité de données spécifique. Tandis que dans les protocoles SPIN, les nœuds prennent l'initiative d'informer de la disponibilité d'une donnée afin que le nœud puits ou les autres nœuds intéressés puissent exprimer leurs intérêts en envoyant des requêtes.

Ainsi, l'économie de l'énergie est assurée par la technique de la Diffusion Dirigée vu que les données sont transmises à la demande surtout dans les applications où les données ne sont pas transmises en continu.

III.5.4. Protocoles de routage basés sur la QoS

Le principe des protocoles de routage basés sur la QoS (Quality of Services) est fondé sur le respect de satisfaire certaines métriques exigées par l'application mise en place dans le réseau. Ceci, passe par la capacité de garantir l'optimisation des ressources du réseau et des performances liées au fonctionnement du système de communication telles que : le délai de transmission de bout-en-bout, l'énergie, la bande passante, le taux de perte des paquets lors du processus de transmission, etc.

Dans cette catégorie de protocole on peut citer le protocole SPEED qui est souvent utilisé dans applications dans les réseaux de capteurs sollicitant un suivi des données en temps réel. Chaque nœud maintient des informations sur tous ses voisins et procède par un routage géographique. Le protocole SPEED tente de garantir une certaine vitesse pour chaque paquet envoyé pour permettre de garantir des délais de livraison acceptables et optimaux, de sorte que l'application ait une idée du délai moyen de bout en bout entre les nœuds. Si le protocole de routage rend disponible la vitesse estimée du paquet, l'application peut calculer ce délai au préalable, en divisant simplement la distance entre la source et le puits par la vitesse estimée. Le protocole fournit également un mécanisme d'évitement de la congestion en cas de besoin.

III.6. Classification par la structure du réseau

Les protocoles appartenant à cette classe sont orientés architecture d'où aussi, l'appellation structure du réseau (Figure 3.6). Le principe de ces mécanismes de routage est une approche plutôt structurelle, elle tient compte des caractéristiques aussi bien des nœuds de capteur, des exigences de l'application et de l'architecture du réseau.

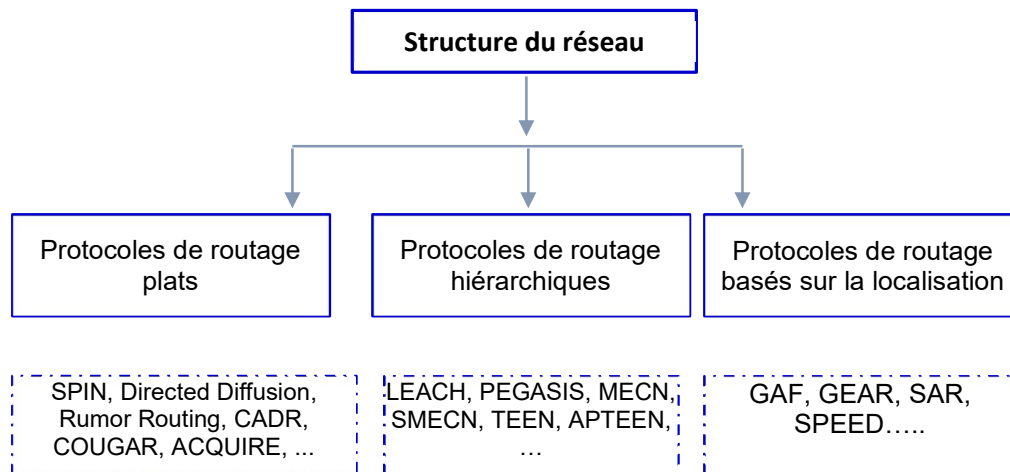


Figure 3.6 : Taxonomie des protocoles de routage dans les WSN basés sur la structure du réseau

Cette classification propose des algorithmes de routage plats, hiérarchiques ou basés sur la localisation. La Figure 3.6 présente la taxonomie des protocoles de routage dans cette catégorie.

III.6.1. Protocoles de routage plats (Flat Based-Routing)

Les protocoles de routage de cette catégorie sont dits plats multi-saut. En effet, tous les nœuds de capteurs ont un statut identique dans le réseau. Ils coopèrent entre eux en s'octroyant et achevant les mêmes fonctions et uniquement le nœud puits qui a la responsabilité de la collecte de toutes les données reçues des nœuds capteurs pour les envoyer vers l'utilisateur final. Il s'agit en fait d'un principe de routage centré données. La station de base annonce sa requête de données dans des régions sélectionnées dans le réseau et attend de recevoir des infirmations des nœuds qui y sont situés. Les informations arrivent donc à la station de base de proche en proche, ainsi le choix d'un nœud pour router ses paquets de données vers un autre nœud dépend de sa position et il est remis en cause à chaque fois qu'il est nécessaire. On constate que lors de formation de nouveaux chemins la caractéristique de la tolérance aux pannes.

On retrouve notamment dans cette catégorie, les protocoles SPIN, COUGAR et CADR qui font partie des protocoles utilisant le routage plat.

III.6.2. Protocoles de Routage Hiérarchiques

Parmi les approches développées dans la littérature autour de l'impact de la variabilité de la topologie dans les WSN et qui a permis une optimisation des communications, on note l'organisation fonctionnelle du réseau en cluster. Il s'agit de la technique de clustering qui est une forme des protocoles hiérarchiques les très convoité.

Le mode de fonctionnement des protocoles de routage hiérarchique consiste à confier des rôles différents aux nœuds du réseau. Ce concept de routage a montré ses avantages particulièrement au niveau de l'optimisation de la consommation énergétique, de la scalabilité ainsi que de l'efficacité des communications. Selon les besoins des applications des nœuds du WSN sont sélectionnés en leur attribuant des activités particulières à exécuter. Un nœud peut être sélectionné pour assurer la fonction de passerelle c'est la fonction du Cluster Head (CH) pour Cluster (un groupe de nœuds), ce qui permet un routage plus simple vu que ces passerelles donnent accès au nœud de destination (Figure 3.7).

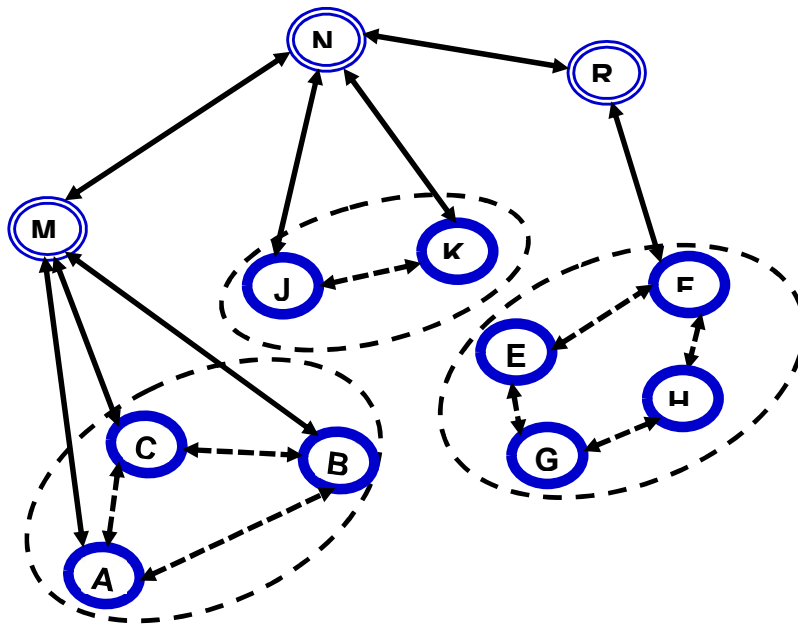


Figure 3.7 : Exemple de routage hiérarchique

Un exemple marquant de l'utilisation des protocoles de routage hiérarchique étant le protocole "LEACH" (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [78] qui représente une des

premières approches de routage pour un maintien efficace de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteur sans fil. LEACH a permis ainsi d'augmenter significativement la durée de vie du réseau en comparaison avec les autres protocoles basés sur le routage multi-sauts. Ce protocole repose sur le concept de la formation de clusters possédant chacun un "Cluster Head (CH)", ce dernier a pour mission la communication avec les nœuds de son cluster et la collecte de leurs données selon le mode de trafic mis en œuvre. Les CH procèdent ensuite, aux traitements des données reçues avant leur transmission à la station de base si celle-ci, appartient à leurs rayons de communication sinon vers d'autres CHs dans leurs portées. Il existe aussi d'autres protocoles de routage hiérarchique tels que TEEN, APTEEN qui sont proposés dans le cas des applications à temps critique.

De cette catégorie de protocoles de routage hiérarchique nous nous sommes inspirés pour développer nos travaux de recherche, en s'appuyant les protocoles LEACH et PEGASIS. Ils seront plus explicitement décrits dans la suite de ce mémoire.

III.6.3. Protocoles de routage basés sur la localisation

Le routage basé sur la localisation (ou sur la géographie) s'appuie sur l'identification des positions des nœuds dans le réseau et par laquelle toutes les décisions de routage en dépendent. Ce type de protocole est préconisé lorsque l'usage applicatif l'impose à travers l'association d'une /la position aux valeurs mesurées par le /les nœuds de capteur du réseau. Son principe est comme suit :

- Tous les nœuds de capteurs sont dotés de moyens de localisations de leurs propres positions via les systèmes satellitaires en embarquant des récepteurs à faible puissance tel que le GPS (Global Position System).
- Les positions autrement dit les distances entre les nœuds voisins ou destinataires sont connues via un partage échangé des informations type mesure de RSSI (Received Strength Signal Indication), ou par le principe de la triangulation (la localisation par mesure des distances)

Le routage géographique est basé sur des décisions qui sont fonction de la progression, la distance et la direction.

A titre d'exemple, on cite les protocoles de routage MECN (Minimum Energy Communication Network) et SMECN (Small Minimum Energy Communication Network) font appels au GPS à basse puissance. Le principe du protocole MECN consiste à la recherche d'un sous-réseau avec moins de nœuds impliqués et qui assure la transmission entre deux nœuds définis avec une

puissance de consommation moindre. Le protocole SMECN (Small MECN) qui est une variante évoluée de MECN crée des sous-réseaux plus petits que celui créé par MECN (en termes de chemins minimaux à très faibles coûts), surtout dans les cas où les diffusions peuvent atteindre tous les nœuds dans une région circulaire autour du nœud diffuseur.

Aussi, le protocole de routage ‘‘GAF’’ (Geographic Adaptive Fidelity) qui fait partie de cette catégorie dans son fonctionnement passe par la création des petites grilles virtuelles adjacentes de la zone couverte où chaque nœud utilise son propre GPS et indique son emplacement dans le but de s’associer à un point dans la grille virtuelle [98]. La Figure 3.8, présente une division en grille virtuelle proposée par l’algorithme du protocole de routage GAF dans un WSN. L’exemple des subdivisions de l’espace du réseau en grille virtuelle est représenté dans la Figure 3.8 par les aires (A, B, et C) de côtés ‘‘r’’ chacune et les nœuds sont numérotés de 1, 2, 3, etc.

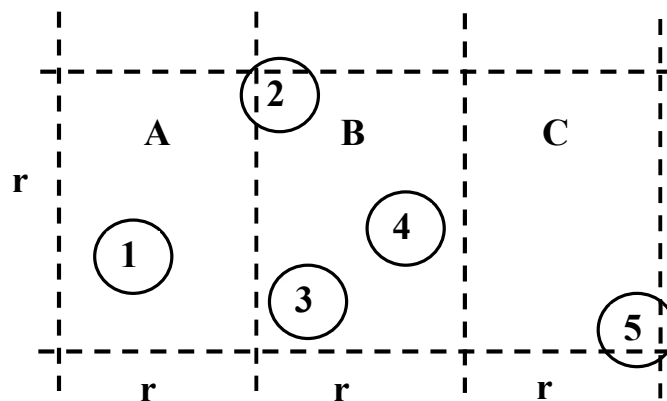


Figure 3.8 : Grille virtuelle - Cas du Protocole ‘‘GAF’’

Le coût de routage est équivalent pour les nœuds associés à un même point sur la grille. Ce qui permet de maintenir certains nœuds se trouvant dans un domaine de la grille dans l’état de repos (Sleep) et économiser ainsi l’énergie. Cette stratégie permet aussi d’accroître la durée de vie du réseau du moment où le nombre de nœuds est grand.

En mettant en veille des nœuds inutiles dans le réseau sans pour autant impacter le niveau de fidélité du routage, le protocole ‘‘GAF’’ contribue ainsi à la conservation de l’énergie. Les nœuds peuvent basculer de l’état recherche-découverte (Discovery), à l’état activé (Active) et à l’état repos (Sleep) en gardant la charge maintenue équilibrée. La Figure 3.9 montre le diagramme de transition d’état associé à un nœud de capteur [99].

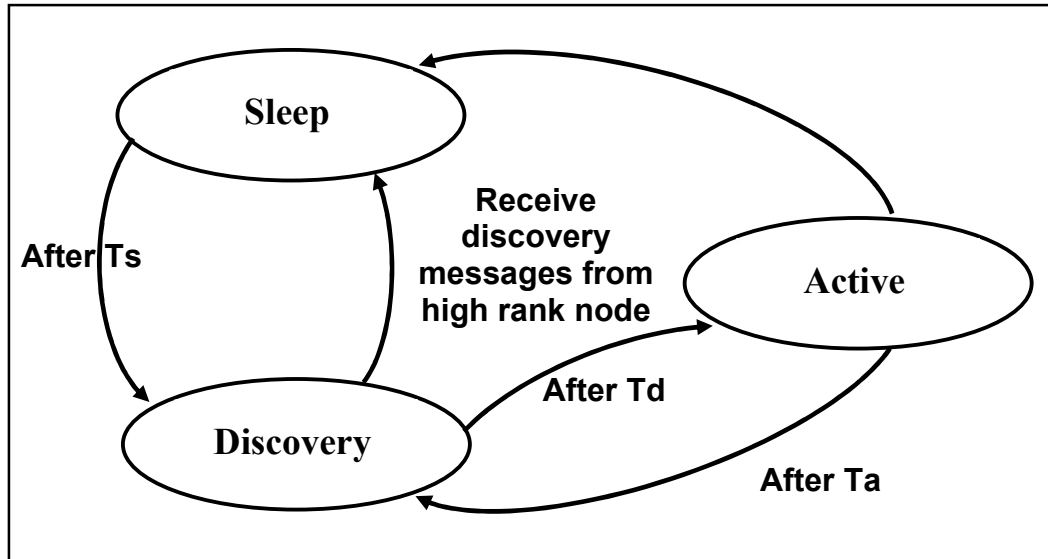


Figure 3.9 : Protocole “GAF” : Diagramme de transition d’état associé à un nœud

Les transitions entre les états s’effectuent périodiquement après les temps T_d , T_a et T_s qui correspondent respectivement aux états : Discovery, Sleep et Active.

- Etat “Sleep” : Le nœud est considéré redondant il est à l’état d’inactivité et son dispositif radio est éteint. Il n’est pas pris en compte dans le routage, ce qui permet de conserver son énergie.
- Etat “Discovery” : Lorsqu’un nœud est initialisé, il est à l’état de découverte. Dans cet état, le nœud échange des messages de découverte avec ses voisins. Le message de découverte se compose de l’ID de grille et des informations concernant le nœud, son ID, sa durée d’activité estimée et son état.
- Etat “Active” : Dans cet état, le nœud participe au routage et gère toutes les communications dans sa grille. Le but de l’algorithme GAF est d’activer un seul nœud dans chaque grille.

Cette revue de synthèse des protocoles de routage montre que la technique de transmission de données par diffusion classique dans un WSN, reste malgré sa simplicité très coûteuse de point de vue énergétique, du fait qu’elle peut amener le réseau à sa saturation par épuisement de batterie de ses nœuds et par la suite à son non opérabilité.

Il existe une diversité de types de protocoles de routage employés dans les WSN. Celle-ci, n’est pas aléatoire, mais elle est justifiée par les besoins des applications. Dans le tableau 3.1 suivant,

on dresse un état général non exhaustif des principaux protocoles connus avec un positionnement de leurs types ainsi que, quelques-unes de leurs caractéristiques respectives.

La classification des protocoles de routage peut être conçu très différemment et en fonction de divers aspects tels que : les structures du réseau, les types de protocoles ou les algorithmes de routage, les caractéristiques des protocoles, la stratégie de transmission, les techniques utilisées, la QoS, etc.

<i>Protocole</i>	Hierarchique	Plat	Localisation	Négociation	Agrégation	QoS	Multi-Chemins	Interrogation
SPIN		✓		✓	✓		✓	
D D		✓			✓		✓	✓
R R		✓			✓			✓
GBR		✓			✓		✓	✓
CADR		✓			✓			
COUGAR		✓		✓				✓
ACQUIRE		✓			✓			✓
EAR		✓						✓
LEACH	✓				✓			
TEEN	✓				✓			
APTEEN	✓				✓			
PEGASIS	✓				✓			
VGA	✓		✓	✓	✓		✓	
GAF	✓		✓					
GEAR		✓	✓					
MFR			✓					
GEDIR			✓					
GOAFR			✓					
SAR		✓	✓			✓		
SPEED		✓	✓			✓		
MMSPEED		✓	✓			✓	✓	

Tableau 3.1 : Classification générale des protocoles de routage (extrait de la littérature)

III.7. Conclusion

En raison de la grande partie de l'énergie dans le réseau est consommée dans la communication sans fil, plusieurs protocoles de communication ont été proposés pour réaliser une

communication efficace dans ces réseaux. Dans ce chapitre nous avons décrit quelques stratégies utilisées pour le développement des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil. Ceci, à travers la présentation d'une taxonomie de différents types de protocoles de routage dans les WSN. Chaque classe est caractérisée par des protocoles de routage qui connaissent des évolutions permanentes et qui ne cessent de se développer afin de prouver leur efficacité dans la conservation d'énergie et l'optimisation de sa consommation pour une durée de vie appréciable des WSN.

Aussi, il est important de rappeler que cette classification n'est pas unique ni exhaustive et on peut selon le contexte de déploiement des WSN s'approprier une situation hybride mettant en jeu différents protocoles simultanément.

Vu l'impact majeur qu'ont les protocoles de routage dans la minimisation de la consommation d'énergie pendant les communications dans les WSN, nous nous sommes alors intéressés à la modélisation de nouveaux protocoles de routage par le biais de l'inspiration et l'adaptation des protocoles de LEACH et PEGASIS.

IV ALGORITHME DE CLUSTERING POUR L'EQUILIBRAGE DES CHARGES ÉNERGETIQUES "CTEB"

IV.1. Introduction

L'objectif principal de ce travail de thèse consiste à fournir un ensemble de solutions d'importance vitale, consentant l'optimisation de la consommation énergétique afin de maximiser la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil. En effet, notre motivation primordiale relative à cette contribution est articulée autour de l'assurance de l'efficacité dans le fonctionnement (état actif ou inactif) individuel des nœuds de capteurs déployés dans le réseau, tout en prenant en charge notamment, les configurations des dispositions énergétiques correspondantes aux différentes formes et type de leur activité.

Nous consacrons ce chapitre à notre première contribution à travers laquelle, nous présentons notre protocole de routage hiérarchique basé sur la technique de clustering. Ce protocole s'appuie sur un algorithme de prédiction qui tient compte de la caractéristique multi-rôles des nœuds de capteur et par conséquent du caractère quantiques et multiformes de consommation d'énergie au niveau de chacun des nœuds de capteurs dans le réseau.

On commence donc ce chapitre par mettre l'accent dans un premier temps sur le besoin d'assurer un compromis global dans la gestion des réseaux de capteurs sans fil et qui est imposé par la couverture et sa dimension, la connectivité, l'énergie dont dispose les nœuds de capteurs et le mode de trafic des données souhaité. Puis, dans un second temps nous continuons par décrire la technique de l'agrégation des données sur laquelle repose celle du clustering avant de

rappeler le principe de fonctionnement du protocole de routage LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) à travers, lequel nous nous sommes inspirés pour développer notre algorithme.

Ensuite, nous poursuivons par montrer notre contribution que nous avons appelé "CTEB" (A Clustering Technique based on Energy Balancing algorithm for routing in wireless sensor networks) qui est une technique de mise en cluster orientée vers l'équilibrage de la charge énergétique entre tous les nœuds du réseau. C'est une résolution qui repose sur une répartition prédictive des profils énergétiques relative à la consommation énergétique propre à chacun des nœuds du réseau. La méthode proposée offre une meilleure répartition de la consommation d'énergie sur l'ensemble des nœuds du réseau, ce qui permet de prolonger la durée de vie du réseau.

IV.2. Compromis dans la gestion des réseaux de capteurs sans fil : la couverture et la connectivité, l'énergie et le trafic de données

Les WSN sont des systèmes fonctionnant avec des ressources extrêmement limitées et pour lesquels, le besoin de simplifier la complexité relative aux communications et au calcul devient imposant. Il est donc indispensable de procéder par l'administration de l'économie des échanges de données en mettant en place des protocoles de routage spécialisés, sensibles à la consommation de l'énergie et offrant une grande évolutivité afin de, préserver la durée de vie du réseau de manière plus acceptable dans divers environnements [78], [106].

Les données détectées et collectées dans le contexte des WSN sont très corrélées spatialement et temporellement du fait de la redondance contenue dans les mesures des capteurs. Que ce soit, au niveau des mesures réalisées par un seul capteur à des périodes de temps successivement définies (corrélation temporelle) ou entre celles effectuées par plusieurs capteurs voisins (corrélation spatiale).

Le déploiement des nœuds de capteurs avec une densité élevée présente des avantages en termes, de la couverture et de la connectivité sans fil qui est une caractéristique très recherchée et très importante. Son maintien est assuré grâce à la propriété d'auto-organisation (aussi d'auto-stabilisation) dont sont dotés les WSN.

Cette propriété est très importante de par les positionnements aléatoires nœuds capteurs lors du processus de déploiement et aussi de leurs défaillances, ce qui causent par conséquent, des changements très fréquents de la topologie du réseau.

De plus, dans le cas où le post-déploiement est possible, le mécanisme d'auto-organisation permet de recréer le réseau à savoir, l'identification des nœuds de capteurs et leurs voisins par

eux même et d'une manière autonome. Toutefois, il est à noter qu'en raison de leur grande densité, les nœuds de capteurs ne peuvent pas avoir toujours un identifiant. Cette opération d'affectation d'adresses constitue un problème à gérer et impose un coût supplémentaire de la consommation énergétique surtout que la topologie des WSN est changeante.

En plus, lors du trafic des données il existe tant d'inconvénients qui sont repérés tels que les problèmes liés à la congestion, à l'augmentation des collisions et aux délais de files d'attente ainsi qu'aux consommations énergétiques supplémentaires engendrées par l'exécution des protocoles de routage qui requièrent l'échange d'informations de contrôle.

Dans un environnement WSN donné les données à récupérer sont généralement massives. De ce fait, lors de l'exécution des protocoles du routage, la prise en compte de la réduction de données redondantes pouvant parvenir à la station de base évite les surcoûts énergétiques inutiles et préserve ainsi l'intérêt de diminuer la consommation de l'énergie dans les WSN.

Parmi, les approches proposées par la communauté des chercheurs dans ce sens, il y a celle relative aux techniques de clustering qui s'appuie sur le principe de l'agrégation des données dont le profit est très intéressant en termes de l'efficacité énergétique et de l'optimisation du trafic. L'adoption d'une structuration hiérarchisée appropriée du réseau permettra de garantir également, la représentabilité spatiale des données collectées.

L'agrégation et le routage sont parmi les outils d'optimisation à basse énergie bien connus, ils ont été largement étudiés et appréhender pour prolonger la durée de vie du réseau dans WSN.

IV.2.1. Agrégation des données

La manière dont les requêtes et les données sont communiquées entre la station de base et les emplacements où les phénomènes cibles sont observés incarne un aspect important et une caractéristique fondamentale dans les WSN.

Une approche simple pour accomplir cette fonction de communication consiste à ce que chaque nœud de capteur échange ses données directement avec la station de base. Toutefois, cette approche basée sur un seul saut n'est pas efficace et coûteuse en énergie, car les nœuds qui sont plus éloignés de la station de base peuvent épuiser rapidement leurs réserves d'énergie, ce qui limite considérablement l'opérabilité et la durée de vie du réseau. C'est particulièrement le cas lorsque, les nœuds sont déployés pour couvrir une grande région géographique ou s'ils sont mobiles, ils peuvent s'éloigner de la station de base.

Pour remédier aux inconvénients de l'approche basée sur un seul saut, l'échange de données entre les nœuds et la station de base est généralement effectué à l'aide des transmissions multi-sauts des paquets de données sur un rayon de communication petit correspondant à la portée. Lorsque des événements spécifiques se produisent dans la zone surveillée ou en réponse à des requêtes émises par la station de base, l'approche multi-sauts non seulement parvient à réaliser des économies d'énergie acceptables mais aussi, réduit considérablement les interférences de communication entre les nœuds de capteurs en concurrence pour accéder au canal, notamment dans les réseaux très denses et à haut débits.

Malgré cela, l'adoption simplement de l'approche multi-saut dans les WSN pour l'échange des données s'avère non suffisante. C'est une situation qu'on rencontre lorsque, les nœuds de capteurs dans le réseau génèrent de façon significative des données redondantes captées par les nœuds les plus proches. L'agrégation de données étant donc une technique très adoptée puisque les capteurs dans différentes régions de l'environnement observé peuvent collaborer pour agréger leurs données et fournir des rendus plus précis sur leurs régions locales.

En effet, dans de nombreuses applications WSN, seule une valeur agrégée de l'ensemble des valeurs collectées dans un cluster ou dans une région bien limitée dans le réseau est à signaler à l'utilisateur final qui est requise. Ce qui exige, dans de telles conditions, à ce que les paquets d'informations semblables provenant de plusieurs nœuds peuvent être agrégés, afin d'atténuer le nombre de transmissions et contribuer à la limitation des surcoûts énergétiques inutiles.

Le concept d'agrégation de données (on parle aussi de fusion de données) consiste en fait, à la combinaison d'informations provenant de différents nœuds pour constituer une donnée complète, ce qui permet d'éliminer les redondances, de minimiser le nombre de transmissions et d'être parcimonieux en matière de consommation d'énergie [82], [83]. Ce concept utilise certaines fonctions telles que la suppression par élimination des doublons, la moyenne, le minima et le maxima ou moyennant des techniques de traitement du signal. L'agrégation des données est l'idée clé pour la plupart des protocoles de routage hiérarchiques.

Ces fonctions peuvent être exécutées partiellement ou totalement dans chaque nœud de capteur, ce qui permettrait aux nœuds d'effectuer une réduction des données circulant dans le réseau. Aussi, dans certaines architectures de réseau, on favorise l'approche qui attribue toutes les fonctions d'agrégation à des nœuds plus puissants et spécialisés.

Par rapport à l'optimisation de la charge énergétique engagée, on sait que le calcul (traitement des données) consomme moins d'énergie que la communication et par conséquent des économies d'énergie substantielles peuvent être obtenues grâce à l'agrégation de données.

IV.2.2. Le concept de clustering

Comme mentionné auparavant, la technique de clustering est généralement combinée avec l'agrégation des données pour réduire le traitement des données et la quantité d'informations transmises dans le réseau. Ceci étant en vue, d'atteindre l'objectif visant à obtenir une efficacité énergétique élevée et à prolonger la durée de vie du réseau dans les différents environnements déployés.

Au niveau de la littérature scientifique, les algorithmes employés dans le clustering sont très variés et l'intérêt du regroupement est recherché généralement, pour faciliter le respect des exigences des applications.

Le clustering est réalisée afin que, l'agrégation de données soit possible et utile, ce qui engage en conséquence, des économies d'énergie significatives. En plus, l'emploi du clustering permet d'équilibrer la consommation d'énergie entre les différents nœuds de capteurs du réseau jusqu'à l'épuisement total de leurs batteries.

La structuration du réseau en clusters doit donc prendre en considération, la limitation des communications redondantes et multiples ainsi que, les changements de l'organisation en clusters.

Dans les WSN, le clustering est une solution prometteuse employée pour partitionner le réseau, afin d'organiser ses nœuds en groupes virtuels de nœuds de capteurs appelés clusters (formation de grappe). Ce partitionnement pour le clustering s'établie en s'appuyant, sur des informations liées au réseau telles que, ses données statiques qui se rapportent aux positions des nœuds lorsqu'il s'agit d'un système fixe ou aussi ses données variables relatives aux niveaux énergétiques des nœuds de capteurs, Le paradigme de clustering est articulé autour de la formation de clusters qui sont des sous-ensembles de nœuds de capteurs possédant chacun un nœud chef appelé Cluster Head (CH) qui l'identifie. [84].

Les Clusters Heads s'occupent de plusieurs fonctions telles que, la coordination et la synchronisation entre les nœuds, l'agrégation et le routage des données. En effet, le CH joue d'une part le rôle d'une station de base locale dans le cluster et d'autres part, celui de relais entre les nœuds de capteur de ce même cluster et aussi de nœud intermédiaire entre les nœuds du réseau et la station de base. Les Clusters Heads collectent toutes les données des membres de leurs clusters en utilisant des liaisons point à point à basse consommation. Ensuite, ils se

chargent de la transmission des données récoltées en les communiquant ou éventuellement les traitant avant de les soumettre à la station de base (BS), qui est la passerelle pour l'utilisateur final. La station de base étant assimilée à un nœud immobile doté de haute capacité de traitement et d'énergie importantes relativement au reste des nœuds. Elle est capable de transmettre et de recevoir les données depuis au vers n'importe quel nœud du réseau et de donner à l'utilisateur une passerelle vers le WSN déployé [85]. Les portées pour les communications entre les Clusters Heads et la station de base sont souvent grandes d'où, le caractère plus énergivore de ces transmissions. L'octroi de statut de "Cluster Head" doit donc se faire de manière rotative entre tous les nœuds du réseau, sinon l'épuisement des nœuds ayant ce rôle devient concluant et rapide par rapport aux autres nœuds qui ne le sont pas.

Conjointement à l'organisation des clusters, l'algorithme adopté pour la réalisation des opérations de clustering doit assurer un compromis entre le nombre et les aires des clusters formés dans le réseau. Un nombre de cluster élevé indique que le nombre des CHs l'est aussi et par conséquent, une consommation d'énergie dédiée aux communications avec les nœuds du même cluster et vers la station de base également élevée. L'ordre de grandeur des aires des clusters formés dans le réseau influe proportionnellement le nombre de communication intra-cluster : entre les nœuds du même cluster et leur CH. Aussi, il est essentiel de définir des clusters de tailles égales pour prolonger la durée de vie du réseau, car ceci évite d'épuiser précocement l'énergie des clusters et de les rendre prématurément dysfonctionnels.

Le nombre de CH dépend du nombre de nœuds de capteurs déployés et de la dimension de la zone qui forme le réseau. La consommation d'énergie est efficacement contrôlée [86], [87], en sélectionnant plus qu'un seul même CH puisque l'énergie résiduelle des nœuds est prise en compte lors du processus de sélection, ce qui est conforme à l'idée principale de répartir équitablement la charge d'énergie de transmission entre les nœuds de réseau.

Les schémas de clusters distribués, dynamiques et randomisés sont attrayants en raison de leur simplicité, leur faisabilité et leur efficacité à fournir très souvent une utilisation relativement économe en énergie, un équilibrage de charge et une évolutivité à la fois [88].

Par ailleurs, même si, la formation et la maintenance des clusters impliquent des coûts supplémentaires en raison des messages de contrôle requis à ces fins, les WSN basés sur le traitement à base de clusters intéressent toujours les chercheurs en raison de leurs meilleures performances.

Beaucoup de travaux de recherches ont discuté le regroupement hiérarchique dans le WSN de différentes perspectives. Plusieurs de ces travaux ont proposé des protocoles de routage hiérarchiques pour prolonger la durée de vie des WSN, afin d'acheminer des données de manière fiable vers la station de base. Certains des protocoles hiérarchiques proposés sont : LEACH [9], [68], PEGASIS [89], TEEN [90], [91], APTEEN [92], etc.

IV.3. Protocole de routage LEACH

De nombreux protocoles de routage ont été proposés pour les réseaux de capteurs sans fil. Le protocole de routage LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [68], [78] est l'un des premiers algorithmes initiateurs du routage hiérarchique et parmi les plus largement utilisés dans les WSN.

Les objectifs de cette catégorie de protocoles de routage hiérarchique entre autres LEACH, se résument dans l'extension de la durée de vie du réseau, en utilisant le concept du clustering qui se base sur l'agrégation des données pour limiter le nombre de messages de communication dans le réseau. Ces protocoles sont alors conçus pour optimiser la consommation d'énergie de chaque nœud de capteur dans le réseau, ce qui affectera positivement sa durée de vie.

En vue de, prendre en charge l'agrégation de données dans les réseaux de capteurs sans fil, il est judicieux de partitionner leurs nœuds en un certain nombre de clusters, pour aboutir à une organisation efficace du réseau. Ce protocole est basé donc, sur le partitionnement dynamique du réseau en un ensemble de clusters possédant chacun un Cluster-Head élu et dont le rôle étant l'établissement d'une liaison relais entre les membres du même cluster et la station de base ou avec d'autres CHs.

Le regroupement des nœuds de capteurs en cluster et autour d'un CH a démontré son gain pour limiter la consommation d'énergie dans le réseau et a permis ainsi la prolongation de sa durée de vie. Le WSN devient ainsi, composé de deux hiérarchies de nœuds de capteurs à savoir : les Cluster Heads (CH) qui forment le niveau supérieur et les nœuds membres qui engendrent le niveau inférieur.

Les nœuds de capteurs affiliés au même cluster envoient leurs données vers leurs CHs correspondants en impliquant les communications multi-sauts à basse consommation ou directement en un saut (one-hop transmission). Après l'agrégation des données reçues, les CHs les transmettent à leur tour vers la station de base lorsqu'ils peuvent l'atteindre en un saut sinon,

en plusieurs sauts (multi-hop transmission) utilisant d'autres CHs. Ce qui réduit davantage la dissipation d'énergie et améliore la durée de vie du réseau.

Même si, la longueur des portées des transmissions effectuées par les CHs engendre un coût énergétique élevé, ce qui risque d'épuiser prématurément les batteries des nœuds opérant comme des CHs, le réseau en entier n'est pas impacté par cette situation. Ceci, étant dû au fait que, le statut de CH n'affecte qu'un petit nombre de nœud de capteurs à la fois. En plus, une rotation aléatoire et périodique est effectuée pour élire les CHs, afin de permettre à tous les nœuds d'assumer une responsabilité collective, pour ne pas vider la batterie d'un seul nœud surtout, pendant les communications vers la station de base.

Aussi, la proximité des nœuds de capteurs individuels entre eux influence fortement la nature des données collectées qui sont souvent corrélées et redondantes, d'où l'intérêt du traitement local fourni par l'agrégation des données et requis pour le clustering.

En plus, de l'amélioration du contrôle de la consommation de l'énergie dans le réseau, cette approche permet de réduire le nombre de messages envoyés et les portées étendues de transmissions ce qui optimisera aussi l'utilisation de la bande passante.

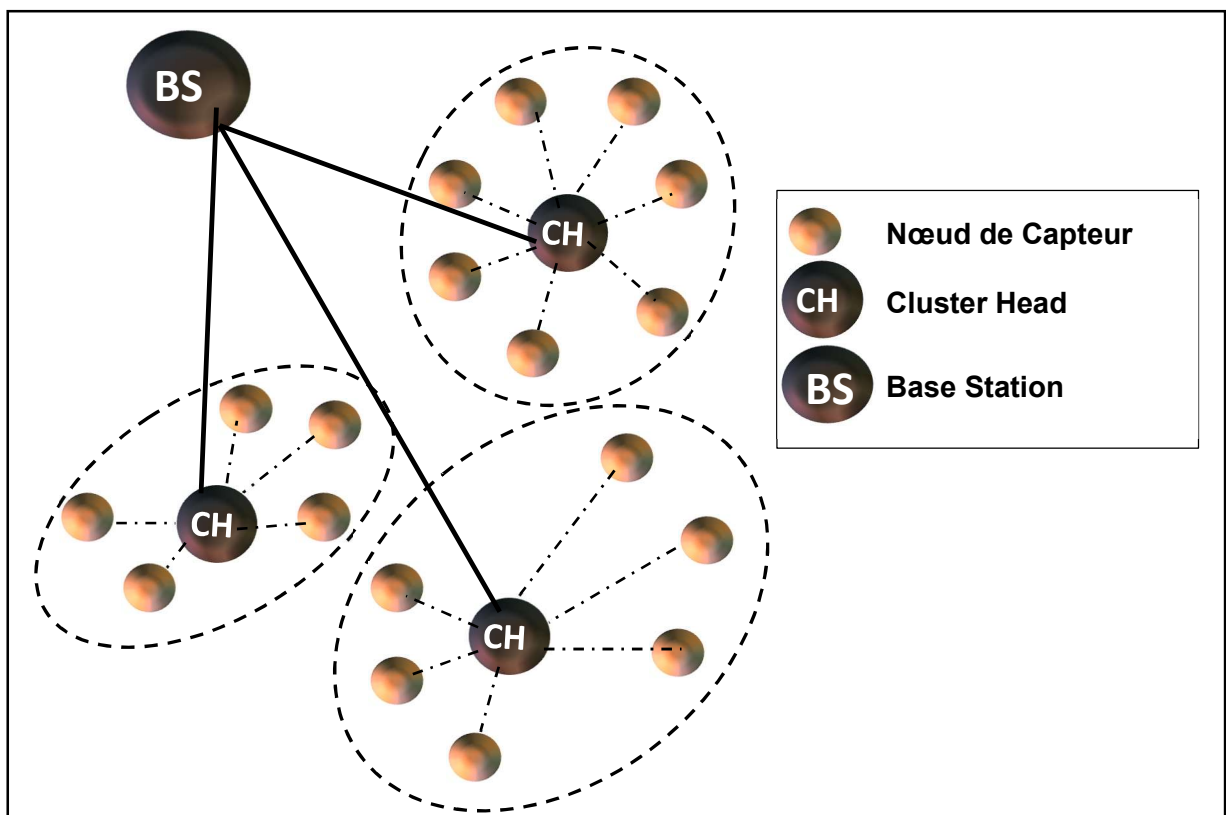


Figure 4.1 : Topologie hiérarchique du protocole de routage LEACH

Dans la Figure 4.1 est présentée la topologie hiérarchique du protocole de routage LEACH où, les nœuds du réseau s'organisent en clusters locaux.

Chaque cluster possède un nœud Cluster Head pour communiquer avec la station de base et pour agir aussi en tant que, station de base locale.

Les Cluster Head se chargent d'effectuer l'agrégation locale des données reçues de la part des nœuds de leurs clusters en vue, de diminuer la quantité de données transmises directement de l'ensemble des capteurs du réseau vers la station de base. Ceci, réduit davantage la dissipation d'énergie et par conséquent, améliore la durée de vie du système.

IV.4. Technique de fonctionnement du protocole LEACH

La technique de fonctionnement du protocole LEACH considère que tous les nœuds capteurs au démarrage de l'activité du réseau sont homogènes et équivalents en énergies initiales. Il s'agit d'un protocole qui fonctionne par une mise en cluster adaptatif et auto-organisé en utilisant, la randomisation en vue, de répartir la charge d'énergie de manière égale entre les nœuds capteurs du réseau.

L'algorithme adopté dans ce protocole utilise une rotation aléatoire entre les nœuds pour devenir Cluster Head afin de, partager équitablement l'utilisation de l'énergie pour les communications vers la station de base. C'est une technique dont les opérations se réalisent périodiquement dans le temps et elles sont accomplies tour à tour par les nœuds du réseau. En fait, si le statut de Cluster Head est attribué à des nœuds fixes, ils mourront rapidement puisqu'ils consommeront plus d'énergie que les autres nœuds notamment ceux de leurs clusters, ce qui empêchera ces derniers à faire partie du réseau par manque de connectivité. On assiste alors à une auto-élection sélective à tour de rôle de quelques nœuds pour former chacun un Cluster Head pendant un tour.

L'algorithme de ce protocole est articulé autour des étapes suivantes :

- L'élection sélective des Clusters Heads
- La coordination avec le voisinage pour la composition des clusters et l'instauration de leurs modes de fonctionnements.
- L'agrégation locale des données par les Clusters Heads, afin de réduire la quantité de message et le temps de communication avec la station de base et essentielle pour préserver l'énergie du réseau.

- L'envoi des messages de données récupérés par les Clusters Heads à la station de base suivant le mode trafic (Query-Driven, Time-Driven,...) est désigné par l'application mise en place
- Le déclenchement ensuite, d'une rotation aléatoire au niveau des nœuds du réseau pour la sélection de nouveaux Cluster Head pour un nouveau tour de transmission vers la station de base.

Le protocole de routage LEACH se base principalement, dans son algorithme sur le calcul d'une valeur seuil $T(n)$ qui est conçue pour garantir avec une probabilité élevée, qu'une fraction "P" prédéterminée de nœuds soit élue Cluster Head à chaque tour. Ceci, en vue d'assurer la couverture du réseau et la récupération des informations de toute la zone déployée.

L'exécution des opérations du protocole LEACH s'organisent selon deux phases distinctes : la phase de configuration (Setup phase) dont la charge consiste à sélectionner les Cluster Heads et la formation des clusters. Puis, de la phase de l'état stationnaire ou plutôt de communication (Steady-state phase) qui est axée sur la collecte, l'agrégation et la transmission des données à la station de base. La durée de la phase de configuration est relativement plus courte que celle de l'état stationnaire qui correspond au régime permanent, afin de minimiser la surcharge du protocole.

Au début de la phase de configuration, le processus de sélections d'une série de Cluster Heads est entamé ce qui garantit la rotation de ce rôle entre les nœuds de capteurs en répartissant ainsi la consommation d'énergie de manière uniforme dans tous les nœuds de réseau. En effet, chaque nœud vérifie son aptitude de devenir Cluster Head durant la période lancée, c'est une décision qui est prise individuellement (localement) et indépendamment des autres nœuds du réseau et aucune négociation supplémentaire n'est nécessaire pour déterminer les CHs, ce qui ne provoque pas des charges énergétiques en plus.

Lorsqu'un nœud "n" du réseau décide être un Cluster Head, il génère un nombre aléatoire, "na" compris entre 0 et 1 et il le compare à une valeur seuil $T(n)$.

Si ce nombre aléatoire "na" est supérieur à la valeur de seuil $T(n)$ calculée, le nœud "n" ne peut pas être élu en tant que Cluster Head. L'expression du seuil $T(n)$ est comme suit :

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

Avec :

- P : indique le pourcentage de Cluster Head souhaité dans le réseau pendant le tour "r".
- r : désigne le tour courant ;
- G : est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été élus Cluster Head pendant les (1/P) tours précédents

Ce seuil T(n) garantit que les nœuds qui ont servi en tant que, Cluster Head dans les derniers tours (1/P) ne sont pas sélectionnés dans le tour en cours. Dans la majorité des cas d'études "P" vaut 5%.

Pour former leurs clusters, chaque Clusters Head élu annonce son statut à tous les autres nœuds du réseau. Sur la base de l'intensité du signal reçu de la part de chaque CH, les nœuds restant du réseau estiment l'énergie de communications nécessaire pour communiquer avec les CHs élus. Et par conséquent, chaque nœud de capteur pourra sélectionner le cluster auquel, il souhaite appartenir en choisissant, le Cluster Head qui requiert l'énergie de communication minimale.

Une fois que tous les nœuds capteurs formant le réseau sont organisés en clusters, chaque Cluster Head établit un ordonnancement avec des slots TDMA (Time Division Multiple Access), afin de spécifier les créneaux horaires alloués à chaque membre de son cluster. Cette disposition permet à tous les nœuds non Cluster Head d'éteindre leurs interfaces radio (désactivation de la composante radio) tout le temps excepté, durant les temps de transmission, ce qui permet de minimiser l'énergie dissipée dans les capteurs individuels.

Dès que, la formation des clusters est achevée dans la phase de configuration, le protocole LEACH bascule à la phase de l'état stationnaire ou de communications. Pendant cette phase, les CHs commencent à recevoir les données détectées par les nœuds de capteurs membres de leurs clusters. Ensuite, les CHs procèdent à l'agrégation des données reçues, en supprimant la redondance, avant de les transmettre compressées à la station de base en utilisant, le protocole CDMA (Code Division Multiple Access) dans le but de réduire les interférences. Dans cette phase on note que seulement les CHs qui sont actifs tout le temps.

À la fin de cette seconde phase, le réseau entre à nouveau dans la phase de configuration pour entamer une autre série de sélection des Cluster Head et le processus de l'exécution du protocole LEACH continu jusqu'à l'épuisement total de l'énergie de tous les nœuds du réseau.

On suppose dans LEACH en plus, du fait que tous les niveaux d'énergie des nœuds de capteurs dans le réseau sont initialement identiques, que chaque nœud a des données à envoyer à un moment donné.

En conséquence, la consommation d'énergie due à l'affectation de statut de CH est pareillement répartie entre tous les nœuds du réseau puisque dans LEACH, il n'existe aucun moyen de distribuer systématiquement le rôle de CH aux nœuds de capteur du réseau.

IV.5. Motivation de la contribution :

Dans cette section nous rappelons la motivation qui a engendré la conception d'une nouvelle approche de mise en cluster dans les réseaux de capteurs sans fil.

Notre approche tire profit du clustering en s'inspirant du protocole de routage LEACH, pour concevoir un protocole de routage capable de maintenir efficacement l'extension de la durée de vie du réseau.

La revue de la plupart des variantes des techniques de clustering [101], [104], [105], proposées dans la littérature scientifique utilisent durant la phase de configuration une rotation aléatoire pour la désignation des CHs. Ceci, en vue de tenter d'équilibrer le coût énergétique dus aux transmissions accomplies par les nœuds du réseau. Mais, lors de chaque tour de transmission, l'échange de messages de contrôles préliminaires nécessaires pour l'affectation de ce rôle ainsi que, pour la formation des clusters conduisent de façon périodique à des dépenses énergétiques supplémentaires.

C'est pour cette raison, que dans une autre proposition de technique [103] l'idée adoptée consiste à ce que la sélection des CHs ne doit pas se faire à chaque tour de transmission mais plutôt, après chaque ensemble de périodes de transmission.

En effet, il a été par conséquent, suggéré que chaque CH sélectionné maintient son rôle pendant plus qu'un tour, ce qui va lui permettre d'effectuer plusieurs transmissions consécutives vers la station de base, avant de concéder ce rôle aux autres nœuds qui seront sélectionnés par la suite. Les durées des périodes qu'occupent les nœuds du réseau pendant qu'ils ont le statut de CHs sont alors déterminées statistiquement. Ce qui, risque d'engager tous les nœuds du réseau à utiliser les mêmes périodes.

Dans de telles circonstances, certains nœuds peuvent être contraints de consommer plus d'énergie que d'autres, à cause de la durée des périodes de leur activité et de leur emplacement dans le réseau par rapport à la station de base. Et par conséquent, leurs batteries s'épuiseront plus rapidement en comparaison avec le reste des nœuds du réseau ce qui compromettra à la couverture du réseau.

Aussi, dans d'autres travaux de recherches [104] et dans l'optique d'équilibrer la consommation des charges énergétiques des nœuds du réseau, on s'est intéressé à la formation des clusters dans les WSN en fonction, du coût énergétique requis par un nœud pour effectuer la transmission vers la station de base. Cette approche s'appuie sur la sélection par rotation, de nœud pour devenir CH en tenant compte de l'éloignement des nœuds par rapport à la station de base ainsi que, de l'énergie résiduelle du nœud dans réseau. C'est une technique distribuée qui se base sur une démarche également stochastique en essayant de donner une probabilité pour désigner les CHs selon leurs distances par rapport à la station de base.

A partir de là, il convient de remarquer que toutes les techniques de clustering proposées utilisent l'approche de la randomisation pour affecter la fonction de Cluster Head aux différents nœuds du réseau. Cette approche influence les réserves énergétiques des nœuds qui sont susceptibles d'être drainées de manière aussi aléatoire et par conséquent, aucune distribution uniforme de la consommation d'énergie n'est garantie.

Notre technique proposée est basée sur l'exploitation équitable et la maîtrise de la consommation de l'énergie du réseau, de sorte que tous les nœuds composant le réseau peuvent cesser leurs activités approximativement en même temps. Ce qui révélera un important renseignement prévisionnel concernant de la durée de vie du réseau.

IV.6. Principe de la technique "A Clustering Technique based on Energy Balancing Algorithm for routing in wireless sensor networks" (CTEB):

La consommation d'énergie et du temps sont les deux défis les plus courants à relever dans le développement des algorithmes de routage pour l'optimisation des communications dans les réseaux de capteurs sans fil.

En se basant sur les travaux précédents, nous proposons notre technique hiérarchique CTEB, de mise en cluster basée sur l'équilibrage de la charge énergétique des nœuds dans le réseau. C'est un modèle de clustering qui permet une meilleure répartition dédiée de la charge d'énergie

nécessaire aux diverses transmissions effectuées par chacun des nœuds des réseaux, tout en prévenant la dégradation de la couverture et de la connectivité dans le réseau [112].

L'idée que nous soutenons dans cette contribution consiste à ce que, si un nœud est sélectionné en tant que Cluster Head, il occupe ce statut (Réception et Envoi des données vers la BS) pour beaucoup de temps. Ce temps est défini en fonction de l'énergie nécessaire, à la fois pour communiquer avec les autres nœuds du réseau quand il est Cluster Head ou si chacun d'eux devient son Cluster Head et aussi, pour atteindre la station de base.

Le protocole que nous avons conçu, illustre une configuration énergétique du réseau. Elle permet de déterminer au préalable, la répartition de la quantité d'énergie globale que possède initialement chaque nœud du réseau pour la transmission de ses données. Etant donné que, notre approche est inspirée du paradigme de la classe des protocoles hiérarchiques, chacun des nœuds déployés dans le réseau ne peut exécuter dans sa vie que des communications, d'une part avec la station de base lorsqu'il est CH et d'autre part, avec les autres nœuds du réseau quand il est membre d'un cluster.

Dans cette optique, nous avons considéré qu'on a un réseau WSN formé d'un ensemble de " N " nœuds, possédant chacun son propre identifiant (ID) " i ". Et la batterie de chaque nœud est dotée d'une énergie initiale qui vaut " E_{i0} ".

Aussi, pour chaque nœud " n_i " déployé dans la zone de couverture, lorsqu'il est désigné Cluster Head, il peut assurer un nombre total de " T_i " périodes de transmissions pendant toute sa durée de vie, jusqu'à l'épuisement totale de son énergie résiduelle.

Autrement dit, si le nœud " 1 " devient Cluster Head pour " T_1 " périodes de transmission, il dépense une énergie qui correspond à " $T_1 \times E_{1 \rightarrow BS}$ ". C'est une énergie qui sera consacré aux transmissions vers la station de base. Aussi, lorsque le nœud " 2 " occupe le statut de Cluster Head et le nœud " 1 " est un nœud membre de son cluster, l'énergie consommée pour les communications entre les nœuds " 1 " et " 2 " vaut " $T_2 \times E_{1 \rightarrow 2}$ ".

On estime dans notre travail que le canal radio est symétrique, ce qui signifie que le coût énergétique de transmission d'un message à partir d'un nœud " n_i " vers un nœud " n_j " est le même que celui, dépensé lorsqu'il s'agit d'un message envoyé d'un nœud " n_j " vers un nœud " n_i " dans tout le réseau.

Soit " E_{10} " l'énergie initiale dont dispose le nœud " 1 ", elle s'écrit comme suit:

$$E_{10} = T_1 \times E_{1 \rightarrow BS} + T_2 \times E_{1 \rightarrow 2} + T_3 \times E_{1 \rightarrow 3} + \dots + T_i \times E_{1 \rightarrow i} + \dots + T_N \times E_{1 \rightarrow N}$$

Ce qui implique l'expression suivante :

$$E_{10} = E_{CH1} + E_{1CH2} + E_{1CH3} + \dots + E_{1CHi} + \dots + E_{1CHN}$$

Où :

E_{CH1} : la partie d'énergie dans E_{10} qui sera dédiée aux transmissions vers la BS quand le nœud " 1 " est CH

E_{1CHi} : est la partie d'énergie dans E_{10} qui sera dépensée par le nœud " 1 " pour les transmissions vers le Cluster Head " i " du cluster auquel il appartient. Sachant que, " i " est un nœud quelconque dans le réseau dont le ID est différent de " 1 ".

Aussi, l'énergie initiale " E_{20} " fournie dans la batterie du nœud " 2 " est formulée comme suit :

$$E_{20} = T_1 \times E_{2 \rightarrow 1} + T_2 \times E_{2 \rightarrow BS} + T_3 \times E_{2 \rightarrow 3} + \dots + T_i \times E_{2 \rightarrow i} + \dots + T_N \times E_{2 \rightarrow N}$$

Qui s'écrit aussi :

$$E_{20} = E_{2CH1} + E_{CH} + E_{2CH3} + \dots + E_{2CH} + \dots + E_{2CHN}$$

Où :

E_{CH2} : la partie d'énergie dans E_{20} qui sera dédiée aux transmissions vers la BS quand le nœud " 2 " est CH

E_{2CHi} : est la partie d'énergie dans E_{20} qui sera dépensée par le nœud " 2 " pour les transmissions vers le Cluster Head " i " du cluster auquel il appartient. Sachant que, " i " est un nœud quelconque dans le réseau dont le ID est différent de " 2 ".

De même, pour le nœud " n_i " l'énergie initiale " E_{ni0} " s'écrit :

$$E_{ni} = T_1 \times E_{ni \rightarrow 1} + T_2 \times E_{ni \rightarrow 2} + T_3 \times E_{ni \rightarrow 3} + \dots + T_j \times E_{ni \rightarrow j} + \dots + T_{ni} \times E_{ni \rightarrow BS}$$

On a alors :

$$E_{ni0} = E_{niCH1} + E_{niCH2} + E_{niCH} + \dots + E_{niCHj} + \dots + E_{CHni}$$

Où :

E_{CHni} : la partie d'énergie dans E_{ni0} qui sera dédiée aux transmissions vers la BS quand le nœud " n_i " est CH

E_{niCHj} : est la partie d'énergie dans E_{ni0} qui sera dépensée par le nœud " n_i " pour les transmissions vers le Cluster Head " j " du cluster auquel il appartient. Sachant que, " j " est un nœud quelconque dans le réseau dont le ID est différent de " n_i ".

Ce raisonnement peut être appliqué à l'ensemble des nœuds capteurs du réseau.

C'est une planification optimisée des types de communication et des durées des activités effectuées par les nœuds de capteurs dans le réseau. Elle répartit l'énergie initiale de chaque nœud, pour ses différentes transmissions prévues dans et à partir du réseau.

D'après, la formulation précédente des énergies initiales des nœuds, on montre à l'aide de l'équation matricielle suivante (4.1), la relation entre les énergies élémentaires que dépenseront tous les nœuds dans le réseau, quand ils seront soit Clusters Heads soit membre d'un cluster :

$$\begin{bmatrix} E_{1 \rightarrow BS} & E_{1 \rightarrow 2} & \dots & E_{1 \rightarrow i} & \dots & E_{1 \rightarrow N} \\ E_{2 \rightarrow 1} & E_{2 \rightarrow BS} & \dots & E_{2 \rightarrow i} & \dots & E_{2 \rightarrow N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{i \rightarrow 1} & E_{i \rightarrow 2} & \dots & E_{i \rightarrow BS} & E_{i \rightarrow j} & E_{i \rightarrow N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ E_{N \rightarrow 1} & E_{N \rightarrow 2} & \dots & E_{N \rightarrow i} & \dots & E_{N \rightarrow BS} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_i \\ \dots \\ T_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{10} \\ E_{20} \\ \dots \\ E_{i0} \\ \dots \\ E_{N0} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Avec :

- $E_{i \rightarrow BS}$ est l'énergie requise pour le nœud " i " pour transmettre à la station de base (BS).
- $E_{i \rightarrow j}$ est l'énergie nécessaire pour transmettre du nœud " i " au nœud " j "
- T_i est la période transmission qu'un nœud " i " effectue quand il est CH

L'équation précédente peut s'écrire sous la forme suivante (équation (4.2)) :

$$[E_{ij}] \times [T_i] = [E_{i0}] \quad (4.2)$$

Or, connaissons les énergies initiales " E_{i0} " de chaque nœud aussi bien que, ses énergies élémentaires E_{ij} ($E_{i \rightarrow BS}$, et $E_{i \rightarrow j}$) la résolution de l'équation (4.2) permet de prévoir de façon optimisée, les durées des différentes périodes de transmissions qu'un nœud peut effectuer jusqu'à l'épuisement de sa charge énergétique initiale.

A partir de l'équation (4.2), le vecteur des $[T_i]$ est ainsi déterminé, en résolvant l'équation (4.3) suivante:

$$[T_i] = [E_{ij}]^{-1} \times [E_{i0}] \quad (4.3)$$

Ce qui, nous renseignera par conséquent, sur le temps d'activité accordé à chacun des nœuds du réseau, quand il est Cluster Head.

Aussi, à travers l'association des T_i (périodes de transmission) et des " E_{ij} " (énergies élémentaires), on déterminera les profils temporels des charges énergétiques dépensées au cours de l'activité des différents nœuds, lorsqu'ils sont membres d'un cluster défini.

Par ailleurs, afin de gérer au mieux le réseau et en arrangeant davantage, la consommation de l'énergie de chacun des nœuds du réseau, la station de base possède l'énergie suffisante et la capacité de calcul nécessaire pour résoudre l'équation matricielle précédente.

En fait, c'est au niveau de la station de base qu'on établit conjointement pour chaque nœud du réseau, les répartitions quantitative et temporelle respectivement de son énergie et des durées qui lui sont allouées pour ses différentes transmissions.

La première partie de l'algorithme que nous proposons est dédiée à la phase d'initialisation de notre technique de routage et l'algorithme 4.1 en est une simple illustration. Il consiste à identifier au départ chacun des nœuds du réseau à travers son identifiant (ID) " i ". Cet identifiant sera utilisé pour désigner les nœuds qui seront déclarés CHs. Et ce, afin de pouvoir attribuer ce statut comme prévu, à tour de rôle pour tous les nœuds déployés.

Après leur déploiement, la station de base reçoit au début toutes les informations concernant tous les nœuds du réseau. Ensuite, une fois la programmation prévue pour chaque nœud est

établie, la station de base se charge de diffuser à chacun des nœuds du réseau les durées des périodes de transmission " T_i " et les énergies élémentaires qui leurs sont associées.

Par la suite, en se basant sur le message reçu, chaque nœud connaîtra la répartition de ses dépenses énergétiques et aussi, quand et combien de fois il sera désigné Cluster Head.

Algorithme 4.1 : Phase d'initialisation du protocole CTEB

- **Début**

1. Déployer aléatoirement " N " nœuds dans une superficie ($M \times M$)
2. **Pour** chaque nœud " n_i " de ID " i ":
3. → Calculer l'énergie nécessaire pour atteindre la station de base : " $E_{i \rightarrow BS}$,"
4. → Calculer l'énergie nécessaire pour atteindre les différents autres nœuds " $E_{i \rightarrow j}$ "
5. → Former un message contenant l'énergie initiale E_{i0} , $E_{i \rightarrow BS}$ et $E_{i \rightarrow j}$
6. → Envoyer ce message à la station de base
7. **Fin pour**
8. Au niveau de la station de base BS
9. → Calculer " T_i ", en utilisant l'équation (4.1)
10. → Arrondir " T_i " à l'unité par défaut (" $T_i \in \mathbb{N}$ ")
11. → Diffuser un message contenant l'ID " i " et les " T_i " pour chaque nœud " i "

- **Fin**

Il convient de rappeler que les valeurs des périodes " T_i " déterminées à partir de la résolution de l'équation matricielle (4.1) sont des nombres réelles positifs qui sont arrondis à leurs parties entières (arrondis " T_i " à l'unité par défaut) puisque les nombres de périodes " T_i " sont des entiers naturels.

Par ailleurs, on sait que le nombre de clusters à créer dans le réseau est un paramètre qui est a priori défini par l'application mise en place, de façon à contribuer à la maximisation de la durée de vie du réseau [9], [68].

Ainsi, dans la seconde partie de notre algorithme, nous présentons l'algorithme 4.2 qui sera utilisé afin d'ordonner les nœuds, pour s'octroyer le rôle de CH et par conséquent, la formation de clusters puis effectuer les transmissions.

Algorithme 4.2 : Formation de clusters et transmissions dans le protocole CTEB

- **Début**
 - 1. Les nœuds avec $ID \in [1, k]$ sont déclarés CH
 - 2. → **Pour** chaque tour "r" de transmission
 - 3. → **Pour** chaque nœud membre "ni"
 - 4. → Actualiser liste ID des CHs depuis message de formation de cluster
 - 5. → Décrémenter "Ti" pour la liste des CHs
 - 6. → **Si** $T(CH_i)=0$, **alors**
 - 7. → **Si** $ID(i) = \text{Max} [(ID \text{ des } K \text{ CH}) + 1]$
 - 8. → "ni" se déclare CH
 - 9. → Reformation des clusters
 - 10. → **Fin Si**
 - 11. → **Fin Pour**
 - 12. → **Fin Pour**
 - 13. → Chaque CH reçoit des messages de ses membres, les agrège et les envoie à la BS
 - 14. → **Fin Pour**
 - **Fin**
-

Nous avons donc estimé, un nombre "K" comme la valeur qui détermine le nombre de clusters à créer dans le réseau. Ainsi, à tout moment, "K" clusters doivent être créés.

Dans le dernier travail cité [104], la mise en cluster du réseau est faite de façon stochastique donc en moyenne "K" clusters sont formés par tour.

En revanche, dans notre travail proposé puisque la configuration des dispatching énergétique et temporelle des transmissions est élaborée au préalable par la station de base avant le démarrage de l'activité du réseau on a alors, à tout moment exactement "K" clusters qui sont formés. Ceci, est concrétisé par le fait que les CHs ne sont pas élus aléatoirement, mais leurs désignations aussi bien que, leurs durées d'activités sont optimalement prédéfinies.

Ainsi, pour amorcer la structure et l'activité du réseau, l'identifiant minimal (IDmin) est attribué au nœud qui sera le premier Cluster Head dans le réseau. Dans notre cas, il s'agit du nœud "n₁". En adoptant, un ordre croissant pour l'affectation des identifiants ID, on désignera les K-clusters voulus de la sorte que, lorsqu'un nœud occupe le statut de CH, il s'octroie ce rôle pendant de nombreuses périodes consécutives, ce qui correspond à la durée déterminée dans la solution de l'équation matricielle (4.1) ci-dessus.

Pendant le fonctionnement du réseau, dès qu'un CH achève sa mission, un autre CH est désigné afin de préserver les "K" clusters qui doivent être formés. Le nœud "i" qui occupera ce statut de nouveau Cluster Head sera celui dont la valeur de son ID correspond à celle du plus grand ID des nœuds déjà CH incrémenté de 1. Les autres nœuds encore CHs y resteront jusqu'à l'achèvement de ce rôle tandis que, les membres de leurs clusters subiront des changements. Le choix de nouveaux CHs suit un ordre continu est croissant des valeurs des IDs. Ainsi, à chaque changement de CH, les nœuds se convertissent vers les CHs les plus proches pour reformer de nouveaux clusters est poursuivre l'activité du réseau.

IV.7. Simulation et résultats :

Pour procéder à la simulation de notre protocole CTEB, nous considérons un environnement réseau avec "N" nœuds déployés de manière aléatoire.

Les valeurs des paramètres utilisés dans notre travail sont données dans le Tableau 4.1.

Type	Description	Symbole	Valeur
Réseau	Dimension du réseau	M*M	100m×100m
	Nombre des nœuds du réseau	N	100
	L'énergie initiale de chaque nœud	E_{i0}	1J
Application	Longueur du paquet de données	L	4000 bits
	Probabilité optimale de devenir Cluster Head dans LEACH	P_{opt}	0.05
Modèle Radio	Energie électronique par bit	E_{elec}	50nJ/bit
	Energie de l'amplificateur	ϵ_{fs}	100pJ/bit.m2

Tableau 4.1 : Valeurs des paramètres de la phase d'initialisation et de simulation

Aussi, on suppose que dans le réseau la distance entre deux nœuds "i" et "j" qui est une distance euclidienne, est évaluée par rapport au nombre de sauts. Elle représente le nombre minimal de sauts que doit traverser un message entre les nœuds "i" et "j".

On rappelle que tous les liens sont supposés bidirectionnels et ils possèdent la même portée de transmission.

IV.7.1. Evaluation de la durée de vie du réseau selon les protocoles CTEB et LEACH

Les premiers résultats de la simulation de notre protocole CTEB sont illustrés dans la Figure 4.2. Il s'agit d'une comparaison du comportement de l'évolution de la durée de vie du réseau, entre le protocole que nous avons développé CTEB et celui de LEACH.

La Figure 4.2 est une représentation de la dissipation de l'énergie globale de l'ensemble des nœuds du réseau en fonction du nombre de transmission réalisées et ce, jusqu'à l'épuisement de leurs batteries.

Dans notre conception, le réseau utilise 100 nœuds capteurs déployés entre les coordonnées suivantes : $(x=0, y=0)$ et $(x=100, y=100)$ et la station de base est située à $(x=50m, y=290m)$. L'énergie initiale de chaque nœud étant estimée valoir 1J.

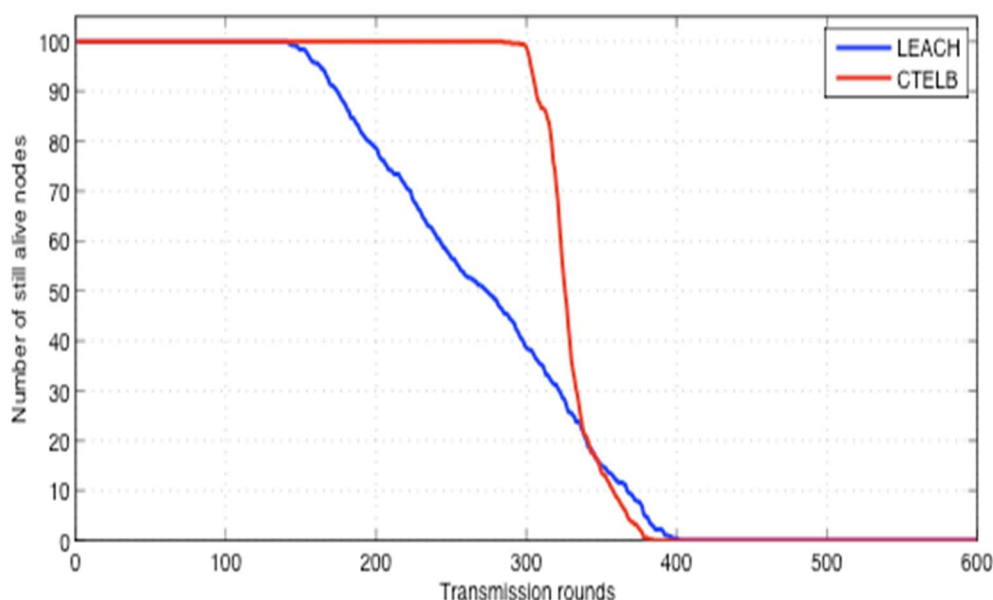


Figure 4.2 : La consommation des énergies des nœuds en fonction du nombre de transmission : comparaison entre le protocole développé CTEB et LEACH jusqu'à épuisement du premier nœud

A partir de ce graphique, on s'aperçoit que lorsqu'on adopte notre protocole CTEB, on arrive à prolonger la durée de vie de tous les nœuds de capteurs déployés et par conséquent du réseau et ce, pour plusieurs tours de transmissions. L'activité du réseau est donc maintenue plus longtemps par presque l'ensemble des nœuds, grâce à l'équilibre des charges garanti par l'implémentation du protocole CTEB. Ce qui, permet d'assurer plus de couverture et de connectivité. Aussi, on peut constater que les nœuds ne commencent à drainer leur énergie de façon significative qu'à la fin de la durée prévue pour l'activité du réseau.

Ces dépenses énergétiques accrues se produisent presque au même moment pour tous les nœuds du réseau et ce, pendant un intervalle de temps nettement petit, par rapport au temps total attribué aux différents tours de transmissions.

En revanche, selon LEACH la mort des premiers nœuds est prématurément perçue, ce qui impacte négativement la couverture et la connectivité recherchées au niveau du réseau.

En ayant, une estimation sur la durée de vie maximale que pourra avoir le réseau notre protocole CTEB est apte à répondre, aux besoins du déploiement. En effet, il est à constater que le protocole proposé dans ce travail permet d'allonger la durée de vie du réseau pour de nombreux tours de transmission et pour différents emplacements de station de base.

Les performances du protocole CTEB proposé sont donc meilleurs que celles délivrées par le protocole LEACH.

IV.7.2. Evaluation de la durée de vie du réseau en fonction de l'énergie initiale des nœuds

Dans cette seconde évaluation nous nous sommes intéressés l'évolution de la durée de vie du réseau en fonction de la variation de l'énergie initiale des nœuds.

La Figure 4.3 illustre la variation de la durée de vie du réseau lorsque l'énergie initiale de ses nœuds varie de 0,5J à 2J.

L'algorithme proposé a permis d'allonger la durée de vie du réseau pour différentes valeurs d'énergies initiales contenues dans les batteries des nœuds du réseau. C'est une constatation qu'on peut déduire par comparaison des résultats de la simulation en utilisant les protocoles CTEB et LEACH.

L'observation de la Figure 4.3 montre que la durée de vie du réseau est proportionnelle à l'énergie initiales des nœuds. Aussi, sur la Figure 4.3, on constate qu'en utilisant notre protocole CTEB, les nœuds du réseau arrivent à améliorer la préservation de leurs énergies en comparaison avec le protocole LEACH, ce qui a enregistré une variation positive de la durée de vie du réseau.

En effet, on s'aperçoit que pour toutes les valeurs d'énergies initiales comprises entre 0,5 J et 2 J des nœuds déployés, on a des variations clairement considérables des niveaux des durées de

vie. Les performances obtenues en utilisant notre protocole sont de l'ordre du double par rapport à celles de LEACH.

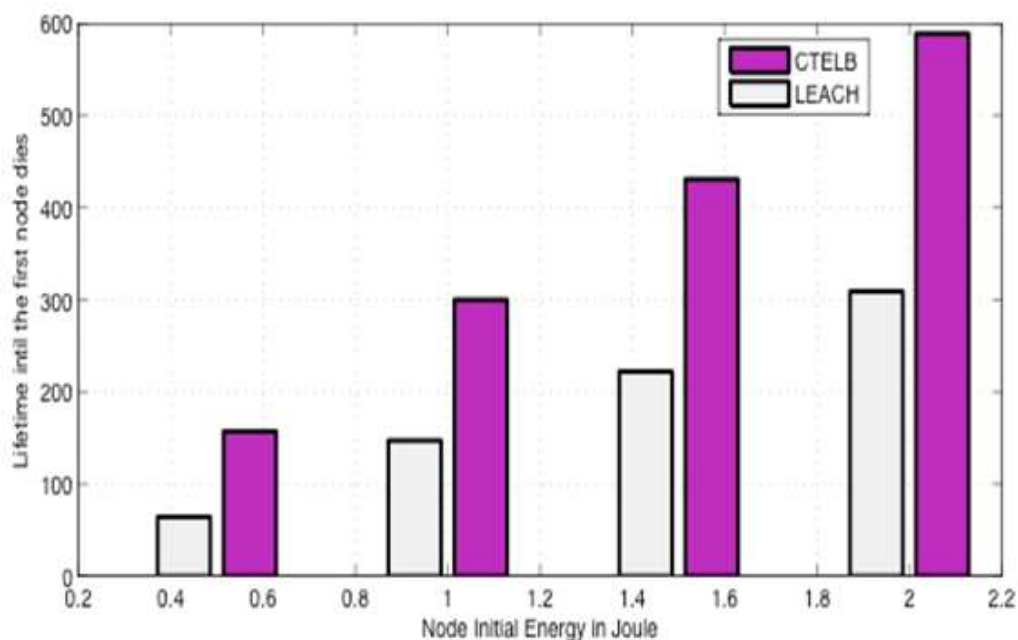


Figure 4.3 : Durée de vie du réseau pour différentes énergies initiales jusqu'à la mort du premier nœud

Ceci, montre par conséquent, que le protocole CTEB que nous présentons dans ce travail est plus intéressant dans ce cas d'étude de par son rendu qui dépasse celui prévu par LEACH pour l'amélioration de la durée de vie du réseau.

IV.7.3. Durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds du réseau

Une autre évaluation paramétrique nous a semblé aussi nécessaire, afin de valider les performances de notre protocole. Elle se rapporte à l'analyse du comportement de la durée de vie en fonction de la variation du nombre de nœuds déployés dans le réseau. Ce choix de paramètre pour évaluation, évoque son impact sur la couverture et la connectivité dans les réseaux WSN.

La Figure 4.4 décrit les changements de la durée de vie du réseau pour différents nombres de nœuds de capteurs dans le réseau.

Comme le montre la Figure 4.4 notre protocole CTEB n'est pas impacté par la densité du réseau. En effet, lorsque le nombre des nœuds du réseau varie les résultats de la simulation sont très intéressants.

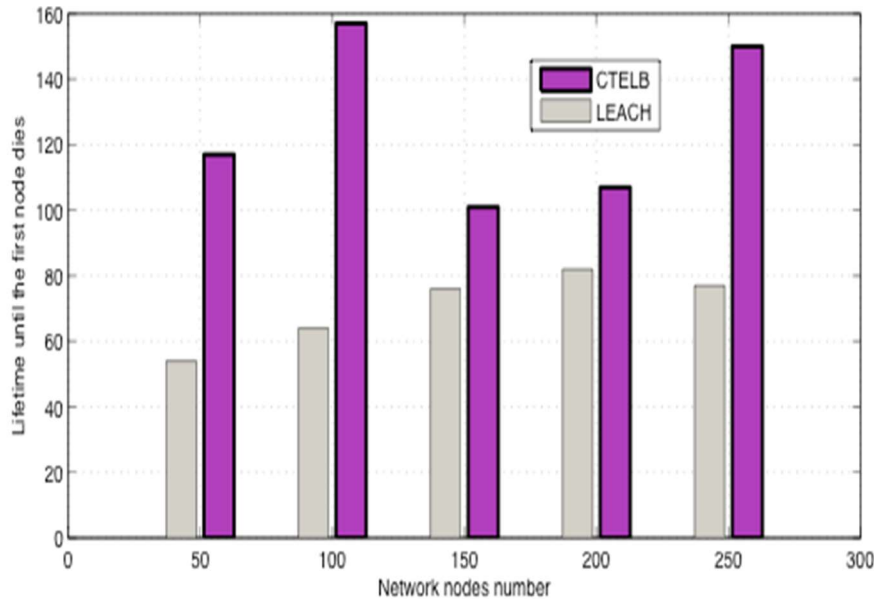


Figure 4.4 : Durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds du réseau.

Ceci, révèle par conséquent une propriété intrinsèque des réseaux de capteurs sans fil qui est la scalabilité et avec laquelle notre protocole proposé s'adapte. En plus, si on compare les résultats délivrés par le protocole LEACH, on constate qu'ils n'atteignent pas les performances générées par notre protocole CTEB.

De ce fait, on conclut que l'algorithme de notre protocole proposé permet une extension de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil meilleure que celle du protocole LEACH.

IV.8. Conclusion

Comme nous avons rappelé au début de ce chapitre, le routage hiérarchique est proposé pour réduire la consommation d'énergie en localisant la communication de données au sein d'un cluster et en agrégant les données et ce, pour diminuer les transmissions vers la station de base. La technique de mise en cluster est une des principales méthodes utilisées pour acheminer les informations dans les réseaux de capteurs sans fil. En plus, l'agrégation des données permet non seulement d'améliorer la fidélité des mesures rapportées, mais aussi elle réduit les charges énergétiques des communications dans le réseau, entraînant ainsi des économies d'énergie significatives.

Dans ce chapitre nous avons exposé le développement du protocole de routage que nous avons proposé. Ce protocole CTEB est fondé sur une technique de mise en cluster basée sur l'équilibrage de la charge énergétique dont le but est d'assurer une meilleure répartition de la charge d'énergie de transmission, sans que la couverture et la connectivité ne soient dégradées.

L'algorithme de CTEB élaboré a permis d'équilibrer correctement l'énergie de transmission sur l'ensemble des nœuds du réseau, ce qui a optimisé la consommation énergétique et a conduit à une extension intéressante de la durée de vie du réseau par rapport aux résultats générés par le protocole de routage LEACH.

Les performances de notre protocole sont validées après évaluations dans le cas de dimensions différentes de réseau, par variations du nombre de nœuds dans le réseau et pour différentes énergies initiales de nœuds. Les résultats de la simulation montrent l'importante amélioration apportée par notre protocole CTEB en comparaison avec le protocole LEACH.

V

TECHNIQUE DE COLLECTE EFFICACE DE DONNEES POUR LA MAXIMISATION DE LA DUREE DE VIE “ELMDG”

V.1. Introduction :

De façon générale, les réseaux de capteurs sans fil sont un type particulier, des réseaux dans le domaine des communications sans fil. Les applications offertes par les WSN représentent certes, un nouveau paradigme pour l'exploitation du “réseau” [10], [11], dont les objectifs différents de ceux des réseaux sans fil traditionnels [24].

L'évaluation des performances d'un réseau de capteurs sans fil est tributaire de sa durée de vie qui est la métrique la plus importante pour son utilité et son usage. La limitation de ces ressources énergétiques étant une contrainte inhérente [20], [78] et déterminante pour ces réseaux.

La conception des protocoles de routage dans les WSN est sans doute une solution prometteuse qui ne cesse d'évoluer en vue, d'assurer une meilleure efficacité énergétique des batteries de ses nœuds tout en répondant aux exigences des applications. Il s'agit en fait, d'éviter au niveau, de chaque solution protocolaire, les causes génératrices de la surconsommation d'énergie, lors des opérations d'acheminement des données dans le réseau. En effet, à partir des résultats de recherche sur les protocoles de routage utilisant des schémas d'agrégations des données nous avons orienté notre présent travail, dont le but de réduire et d'équilibrer autant que possible, la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil.

C'est dans cette lignée, que nous avons proposé notre protocole de routage développé sur la base d'une technique hiérarchique de collecte des données dans un réseau de capteurs sans fil.

Ceci, étant à travers l'emploi d'une autre variante de la hiérarchisation qui utilise une structure en chaîne et non pas en clusters, comme nous avons procédé dans le chapitre précédent.

Le principe de la présente contribution objet de ce chapitre est basé sur le protocole PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) [89]. Nous l'avons appelé ELMDG (pour Efficient Lifetime Maximization Data Gathering technique for routing in wireless sensor networks). Elle consiste en la formation d'une chaîne composée des nœuds de capteurs déployés dans le réseau pour la collecte des données vers la station de base tout en optimisant la consommation d'énergie.

Ce chapitre est organisé comme suit : dans le premier paragraphe on décrit sommairement le routage hiérarchique à base de structure en chaîne. Puis, on continue dans les paragraphes suivants, en rappelant le principe de fonctionnement du protocole de routage PEGASIS et en explicitant la motivation de notre contribution. Ensuite, on entame la présentation de notre nouvelle technique, en passant en revue entre autres, son principe et les considérations liées à la problématique de la durée de vie des réseaux, avant de montrer les performances déduites des évaluations réalisées.

V.2. Le routage hiérarchique à base de structure en chaîne : Algorithme glouton

Les réseaux de capteurs sans fil étant une classe émergente des technologies sans fil. Ils présentent beaucoup d'intérêt de par, leur intelligence intégrée ce qui permet d'apporter de nouveaux défis, aussi bien scientifiques que technologiques. Le déploiement des réseaux de capteurs sans fil a pour fonction principale la collecte et l'acheminement des informations, à partir d'environnements donnés vers une station de base ou vers un centre de traitement et d'exploitation en aval et ce, afin de répondre aux besoins de différentes applications.

Dans le chapitre II nous avons présenté en détail le bilan de la consommation énergétique dans les WSN. A partir, de l'analyse des formes de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, on montre que la grande partie de l'énergie des batteries est consommée par les transmissions dans le module radio [1]. C'est pourquoi, il faut désactiver la radio la majorité du temps (par une commutation cyclique entre mode réveil et sommeil) pour éviter des surcoûts énergétiques inutiles causés entre autres par les collisions, l'écoute abusive (overhearing relatif au temps d'écoute du canal des nœuds voisins) ou l'écoute active (overhead dus aux messages de contrôles supplémentaires),... D'où, l'intérêt de l'élaboration et de la maîtrise des protocoles de routage adéquats dont l'objectif entre autres la réduction du trafic dans le réseau.

En effet, par nature, le routage de données dans les WSN est un problème difficile dont la solution, par rapport à diverses mesures de performance doit répondre à de nombreuses

exigences de conception telles que : la capacité restreinte des nœuds en termes des puissances d'énergie, de calcul et de mémoire, la densité et la scalabilité du réseau, les faibles débits de données et la non fiabilité du canal radio.

Le besoin donc d'assurer un compromis pour le maintien de la couverture et de la connectivité conjointement à l'optimisation de la consommation d'énergie se veut nécessaire.

Parmi les outils utilisés qui peuvent grandement soutenir la scalabilité, le prolongement de la durée de vie et l'efficacité énergétique globale du système "Réseau de Capteurs Sans Fil", nous puissions du routage hiérarchique qui est un concept de hiérarchisation axé sur la structuration du réseau. C'est un mode de routage orienté vers l'économie d'énergie dont l'utilisation permet d'aboutir à des gains d'énergie dans chacun des nœuds du WSN.

Les travaux sur le routage hiérarchique dans [84], [85] distinguent les rôles des nœuds dans le processus de routage. Cette une répartition fonctionnelle qui confie aux différents nœuds du réseau des rôles différents, tels que ceux relatifs au traitement et aux transmissions des informations, au statut d'être un point d'agrégation des trafics des nœuds voisins (avec ou sans corrélations spatiales des événements physiques observés et grandeurs mesurées) ou tout simplement de se préoccuper de la détection des données à proximité dans l'environnement déployé. Ceci, vise à limiter en quelques sorte, le volume du trafic de contrôle, simplifie les opérations de filtrage, d'agrégation et/ou de compression des données,

Dans le chapitre précédent nous nous sommes intéressés au routage hiérarchique basé sur le clustering (la structuration en clusters) tandis que, dans ce chapitre notre intérêt pour le routage des données sera accordé à la hiérarchisation par la structure en chaîne. Les nœuds de capteurs d'un WSN sont donc organisés sous forme de chaîne.

En effet, dans la structure en chaîne, on conçoit la formation d'une chaîne par le biais de la transmission coopérative des paquets de données. Elle est établie pour que chaque nœud du réseau communique uniquement avec deux nœuds de ses plus proches voisins respectivement, pour recevoir et émettre un paquet de données. C'est une approche qui exploite les portées minimales pour effectuer successivement les sauts nécessaires pour atteindre la station de base. Ainsi, pour engager un prochain saut, cette technique se base sur des métriques géométriques, elle consiste à choisir un voisin de destination situé à une distance minimale. Cette stratégie de transmission de données se poursuit jusqu'à un nœud particulier dit "leader de la chaîne" (LC) dont la charge est de transmettre le paquet des données agrégées vers la station de base. Les nœuds peuvent également être équipés d'émetteurs-récepteurs radio compatibles CDMA (Code Division Multiple Access).

Or, dans cette forme de routage des données, tout nœud du réseau est supposé connaître ses coordonnées géographiques et celles de ses voisins pour pouvoir communiquer en un seul saut avec les plus proches voisins.

Ceci, implique par conséquent, que nous évoluons dans l'exploitation des protocoles de routage géographique puisque l'information sur la localisation des nœuds de capteurs dans le réseau est obligatoire et en plus disponible. C'est une sorte de technique de routage hybride engageant le routage hiérarchique et géographique. Ce qui montre par ailleurs, la porosité au niveau des classifications existantes pour les différentes catégories des protocoles de routage.

Dans cette stratégie de routage, l'algorithme du protocole implémenté fonctionne selon une progression par étapes successives. Et ce, suivant un choix de voisinage localement optimal tout en essayant, à chaque saut de valider sa décision en vue, qu'elle soit aussi optimale pour le réseau en entier. C'est une approche qui évoque un aspect qui est certes simple et économe en énergie mais, en réalité il s'agit, d'une technique qui a la propriété d'être avide en puissance énergétique.

En fait, en utilisant cet algorithme, on augmente progressivement la distance vers la station de base à mesure que la chaîne se construit et par conséquent, on augmente aussi la consommation de l'énergie dans l'ensemble du réseau. On s'aperçoit donc, que la formation de la chaîne exécute un algorithme qui ne tient pas compte de l'optimisation de la consommation de l'énergie.

Comme nous avons rappelé auparavant, la conservation de l'énergie est un problème primordial pour l'organisation des nœuds de capteurs dans les WSN, en vue de l'acheminement de leurs données récoltées. Ceci, explique le panel très varié de propositions de protocoles de routage et dans la plupart la durée de vie est considérablement prise en charge.

Le routage hiérarchique dans les WSN est exploré de plusieurs points de vues dans de nombreux travaux de la littérature, on peut citer parmi ces protocoles, PEGASIS [89], TEEN [90], [91], SEP [100], DEEC [101], CCM [110] et APTEEN [92],...

V.3. Protocole de routage PEGASIS

PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) [89] est un protocole de routage hiérarchique qui est considéré comme une extension améliorée de LEACH. C'est un protocole qui vise à développer une architecture de routage et un schéma d'agrégation des données, afin de réduire la consommation d'énergie et de transmettre les données agrégées à la

station de base avec un délai minimal. Ceci, tout en équilibrant la consommation d'énergie entre les nœuds de capteur.

Dans la catégorie des protocoles de routage hiérarchiques, on distingue ainsi une dimension relative à la manière d'agrégation des données dans les WSN. En effet, il existe des protocoles de routage hiérarchiques qui reposent pour la collecte et la diffusion des données sur certaines structurations du réseau telles que celles organisées en arborescence ou en clusters. Au niveau de PEGASIS, cet aspect est mis en œuvre dans son algorithme en utilisant une structure en chaîne de tous les nœuds du réseau. La Figure 5.1 représente la structure en chaîne adoptée par PEGASIS.

L'organisation alors du réseau selon PEGASIS est basée sur la formation d'une chaîne de nœuds de capteurs de tout le WSN, au lieu qu'elle soit établie sous forme de clusters comme proposée par LEACH. Mais, la construction de cette chaîne de nœuds a la propriété d'être une approche qui exécute un algorithme glouton (Greedy algorithm).

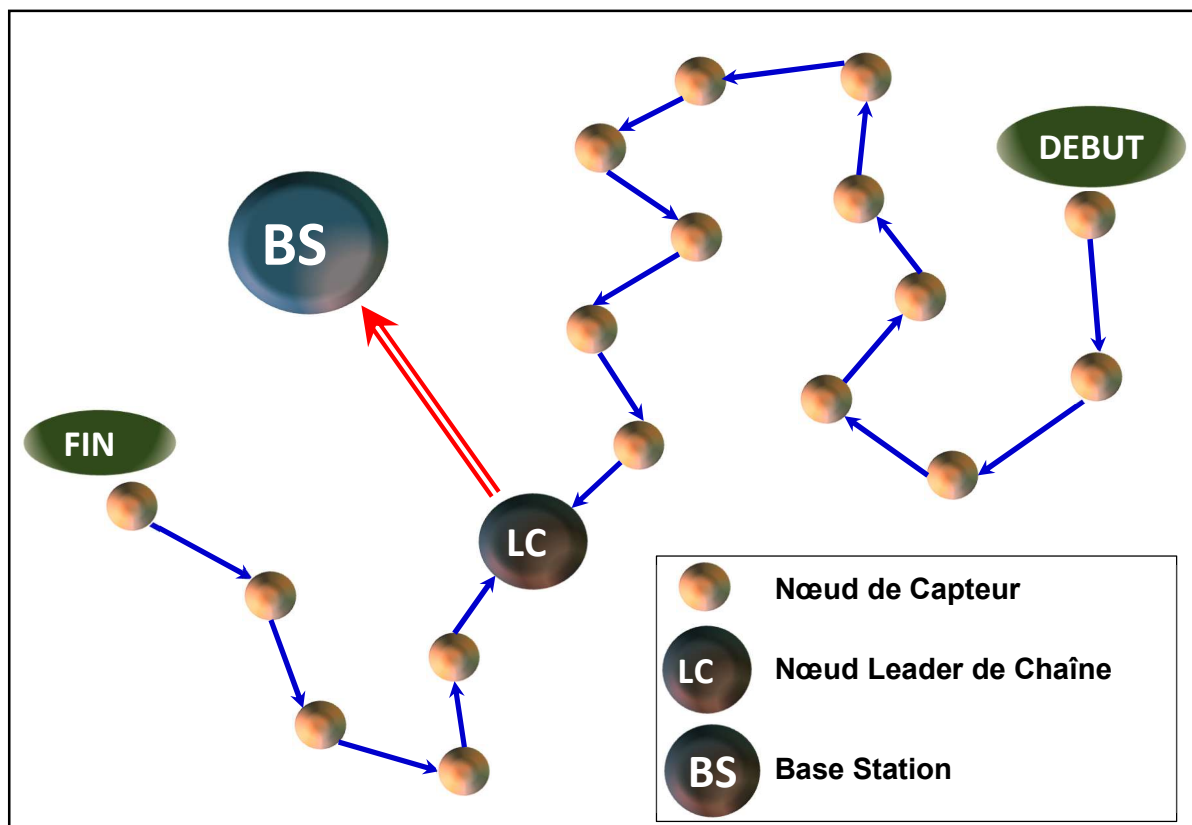


Figure 5.1 : Structure en chaîne du protocole de PEGASIS. [89]

La conception du protocole PEGASIS est basée sur le fait, à ce que chacun des nœuds capteur de la chaîne formée reçoit des données de son proche voisin et les agrège avec les siens en un

seul paquet de données de taille réduite avant de les transmettre à son autre proche voisin qui agit de la même manière.

Ce processus est répété jusqu'à ce que les informations recueillies du réseau pendant un tour soient livrées à un nœud localement sélectionné dans la chaîne appelé nœud LC "leader de chaîne" qui se charge de l'envoi de toutes les données captées et agrégées en données significatives vers la station de base. Chaque période (tour) de collecte de données commence à partir des deux nœuds qui constituent les extrémités de la chaîne formée et le statut de leader LC est affecté à chacun des nœuds de la chaîne de manière tournante, pour assurer la communication directe avec la station de base.

Dans ce protocole, on estime que chaque nœud de capteur a le contrôle de sa puissance et de sa capacité de transmettre ses données à un autre nœud de capteur ou directement à la station de base

Par ailleurs, la similitude entre PEGASIS et LEACH n'exclut pas, quelques particularités distinctives, telles que :

- PEGASIS utilise le routage multi-sauts et un seul nœud est sélectionné pour transmettre les données à la station de base.
- La réduction des charges supplémentaires générées par l'échange des messages de contrôle dues au clustering dynamique comme prévues dans LEACH conduit à un gain en performance de près de 100 à 300% dans PEGASIS. Ceci, puisque d'une part les transmissions sont effectuées en choisissant les petites distances entre les nœuds (non leaders) et d'autres part, une transmission par tour agrégeant toutes les données est faite par le leader de la chaîne vers la station de base.

Basée sur ce principe, PEGASIS réalise une bonne réduction de la consommation énergétique en comparaison au protocole LEACH, car il exige qu'un seul nœud sélectionné pour être le leader pour réaliser une transmission lointaine vers la station de base.

V.4. Principe de fonctionnement du protocole PEGASIS

La technique du fonctionnement de ce protocole est réalisée par l'algorithme du protocole PEGASIS, qui élabore au départ un schéma de routage, engageant tous les nœuds du réseau à communiquer avec leurs plus proches voisins pour former une structure en chaîne. Ce schéma est arrangé soit par les nœuds eux-mêmes ou par la station de base qui le communique par la

suite à tous les nœuds du WSN, avant le commencement de la première période de transmission de données qui correspond au 1^{er} tour.

La construction de la structure des nœuds en chaîne débute par le nœud le plus éloigné de la station de base, pour être sûr que tous les nœuds aient des voisins proches et puissent participer à l'activité du réseau ce qui garantira la couverture et la connectivité de celui-ci. Ce nœud d'extrémité constitue le début de la chaîne.

Ceci, signifie que lors de chaque tour de transmission chaque nœud de départ formera en se joignant à son nœud voisin le plus proche le premier segment de la chaîne à qui il transmettra ses données qui seront agrégées avec les siennes puis celui-ci, les soumettra de même à son autre plus proche nœud voisin. Ainsi, progressivement les autres nœuds du réseau sont ajoutés à la chaîne en commençant par son plus proche voisin qui n'en fait pas encore partie (Figure 5.1). Afin de déterminer son nœud voisin le plus proche, chaque nœud utilise la force de son signal pour mesurer la distance qui le sépare de tous ses nœuds voisins.

À l'aide de cette information, le nœud ajuste sa force du signal pour que seul le nœud le plus proche puisse être entendu. Chaque fois qu'un nouveau nœud est enchaîné, il réalise la même opération jusqu'à ce que l'ensemble des nœuds du réseau soient joints à la chaîne et le nœud "leader" est atteint.

Le nœud "leader" est un nœud qui est aléatoirement sélectionné dans la chaîne formée pour transmettre toutes les données reçues à partir de cette chaîne des nœuds à la station de base.

Après avoir formé la chaîne, la phase de transmission suivant l'agrégation de toutes les données transmises dans le réseau est initiée par le leader (LC) de la chaîne. Dans PEGASIS, l'agrégation des données est déclenchée par le leader, en envoyant un beacon (une balise) aux nœuds situés aux extrémités de la chaîne, pour qu'ils entament la transmission de leurs données à leurs proches voisins réciproques. Ces derniers agrègent les données reçues avec les leurs et les transmettent de même à leurs autres voisins.

Ainsi, les données des deux côtés de la chaîne sont agrégées au fur et à mesure qu'elles se déplacent et se fusionnent d'un nœud à l'autre sur la chaîne jusqu'à atteindre le leader LC.

À la réception des données recueillies du réseau par les deux extrémités de la chaîne, le leader les agrège avec les siennes et les transmet à la station de base en un seul saut.

Soit " N " l'ensemble des nœuds de la chaîne qui composent le réseau :

$$N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_i, \dots, n_N\}$$

Avec :

n_i : un nœud du réseau ayant l'identifiant " i " avec $i \in [1, N]$

Le leader de la chaîne (LC) est un nœud " n_i " choisi sur la chaîne formée. Il est sélectionné pour transmettre les données agrégées pendant une période de transmission " T_j " (ou tour) vers la station de base.

Pour un tour de transmission " T_j ", la sélection d'un nœud " n_i " pour assurer le rôle LC de leader de chaîne [89] est donnée par la relation suivante :

$$n_i = T_j \bmod N$$

Le positionnement du leader sur la chaîne change après chaque tour, pour que tous les nœuds puissent transmettre à tour de rôle à la station de base les données reçues de l'ensemble du réseau. La rotation dans la désignation du rôle de leader entre les nœuds de la chaîne tente à assurer en moyenne une consommation d'énergie équilibrée et uniforme entre tous les nœuds du réseau.

Ainsi, pour chaque tour de transmission vers la station de base le leader de chaîne se trouvera à une position aléatoire sur la chaîne, ce qui est important, lorsque les nœuds dans des emplacements aléatoires épuisent leur énergie. Ce qui entraîne alors, la reformation de la chaîne en suivant le même principe de formation développé en haut.

Cet algorithme a la caractéristique d'être avide, étant donné qu'au fur et à mesure que la chaîne s'agrandit par ajout graduel de nœuds, la distance entre nœuds voisins de la chaîne augmente puisque les nœuds moins distants font déjà partie de la chaîne et ne sont plus reconsidérés. C'est pourquoi il est décrit comme un protocole de routage qui a la propriété d'être un protocole glouton

Il est aussi, important de rappeler qu'il résulte de l'emploi de PEGASIS un important délai de latence dû aux retards des transmissions de paquets de données notamment, si la chaîne est longue et les nœuds sont éloignés du leader.

V.5. Motivation de la contribution

Au fil du temps, plusieurs références bibliographiques ont proposé des perfectionnements au niveau du protocole PEGASIS. L'objectif de ces travaux de recherches étant l'amélioration des performances des WSN, à travers les mesures des différentes métriques de performance souvent employées pour évaluer le rendement du processus de routage. Les métriques d'usage très couramment utilisées sont : la durée de vie du WSN, l'efficacité énergétique, la scalabilité, la latence, la longueur du chemin vers la station de base, etc...

Parmi ces travaux, on cite ceux élaborés dans [106] qui présente deux techniques améliorées pour substituer l'utilisation de l'algorithme avide de PEGASIS. En vue, de former la chaîne des nœuds ces deux techniques commencent aussi, à partir du nœud le plus éloigné de la station de base pour s'assurer de son appartenance à la chaîne.

L'idée de base de la première technique d'optimisation consiste à permettre à chaque nœud d'adopter le statut de leader de chaîne pour un certain nombre de fois.

Soit " X_i " le nombre de fois pour lequel un nœud " i " est leader et a pour expression :

$$X_i = \left(\frac{d_{Bref}^2}{d_{Bi}^2} \right) \cdot X_{ref}$$

Avec :

- d_{Bref} : la distance de référence vers la station de base,
- d_{Bi} : la distance entre le nœud " i " et la station de base
- X_{ref} : un coefficient arbitraire pour contourner l'erreur d'arrondissement " X_i " à l'entier le plus proche.

Dans la deuxième proposition d'optimisation discutée dans [106], les auteurs ont utilisé la technique développée par les algorithmes Ant Colony Optimization (ACO) pour essayer de trouver la chaîne la plus courte en vue, de structurer le réseau sous forme d'une chaîne de nœuds de capteurs efficace de point de vue optimisation énergétique. Ces algorithmes ont été appliqués avec succès dans différents problèmes d'optimisation, notamment le problème du marchand voyageur (traveling salesman problem).

Aussi, d'autres algorithmes de routage basés sur le routage en chaîne ont été développés tel que le protocole Chain-Cluster based Mixed routing (CCM) [109], [110] dont la technique s'appuie

sur un routage mixte basé sur un réseau de chaînes. Le CCM utilise les avantages de LEACH et de PEGASIS. Le principal avantage de LEACH considéré dans ce protocole est relatif à son court délai de transmission, alors que celui de PEGASIS est lié à sa faible consommation d'énergie. Le principe de cette technique consiste à diviser le réseau en chaînes. Dans la première étape, les nœuds de chaque chaîne transmettent leurs données à leur CH. Ensuite, dans la deuxième étape, les CHs des chaînes forment eux-mêmes un cluster et forment leur nouveau CH au niveau duquel toutes les données fusionnées y sont transférées. On note que, les deux étapes de la transmission de données réalisées à travers ce protocole sont particulièrement effectuées lors des routages par la structure en chaîne et par le clustering.

Toutefois, la lecture des évaluations de ces techniques, nous nous révèle, qu'une légère amélioration du protocole PEGASIS.

En conséquence, l'analyse du protocole PEGASIS et de la plupart de ses variantes et dérivés montrent que dans leur majorité, ils proposent que la formation de la chaîne commence du nœud le plus éloigné de la station de base. Cette imposition est certes importante, puisqu'il suppose que tous les nœuds du réseau deviennent enchaînés et exploitables dans l'activité du réseau. Mais, en réalité elle ne contribue pas à la réduction de la longueur de la chaîne, ce qui ne permet pas d'optimiser la durée de vie du réseau. Puisque plus la chaîne formée par les nœuds est longue, plus le transfert des données sur celle-ci, parcourra plus de distance et met plus de temps de latence et donc plus d'énergie consommée.

Dans ce même contexte, nous souhaitons concevoir des solutions d'optimisation des performances des WSN. Pour développer notre proposition, nous nous sommes inspirés du protocole PEGASIS. Il s'agit de l'élaboration d'une nouvelle technique de collecte de données, afin d'uniformiser la consommation d'énergie et de permettre la prolongation de la durée de vie du réseau.

V.6. Principe de la technique ELMDG "Efficient Lifetime Maximization Data Gathering technique for routing in wireless sensor networks":

L'option de remplacement ou de recharge des batteries dans le contexte des WSN est subséquemment une option nettement non envisageable. Ceci, ce n'est-ce que, par rapport à l'échelle quantitative des nœuds déployés sans pour autant considérer les autres contraintes dérivées ou qui en découlent.

Notre objectif principal dans ce travail est par conséquent d'aboutir à l'extension de la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil, composé de "N" nœuds déployés d'une manière aléatoire sur la zone à explorer.

La contribution majeure de notre étude consiste à présenter une approche pour l'amélioration de la technique de formation de la chaîne des nœuds de capteurs. Celle-ci, permet en fait de créer une chaîne de nœuds de capteurs qui représente tout le réseau et dont la longueur est la plus minimale possible. Ce qui ne pourra par conséquent, que concourir efficacement à l'optimisation de l'économie de l'énergie.

V.6.1. Considérations de la problématique

Dans notre recherche, on a considéré que la définition de durée de vie du réseau correspondra à la durée du temps pendant laquelle, tous les nœuds du réseau sont fonctionnels (vivants) jusqu'à l'épuisement de la batterie du premier nœud. Ce qui signifie, que le réseau est exploitable jusqu'à l'instant où un premier nœud aura drainé toute son énergie résiduelle et qu'il ne jouera plus alors sa fonction dans le réseau. D'où, l'impératif de chercher à retarder le temps de l'épuisement de la batterie du premier nœud du réseau et par conséquent, uniformiser le drainage progressif de l'énergie des batteries des nœuds de capteurs.

La station de base étant un nœud fixe et elle est positionnée en dehors de la zone de supervision. On suppose également, que les nœuds sont immobiles et qu'ils sont "reliés" entre eux pour former une chaîne. Aussi, à chaque période de transmission, un seul nœud est sélectionné pour devenir le leader de la chaîne LC, afin de transmettre les données collectées de l'ensemble des nœuds capteurs du réseau puis fusionnées vers la station de base.

Le modèle de dissipation énergétique que nous avons adopté étant celui que nous avons illustré précédemment à partir des travaux développés dans [68]. C'est une modélisation de la distribution de l'énergie dans le réseau, sur la base des ressources énergétiques de ses nœuds de capteur. Elle tient compte du mode de trafic des données adopté pendant l'activité des nœuds ainsi que, de celle de chacun de leurs éléments.

On rappelle que la radio, l'élément le plus énergivore dans un nœud de capteur possède un contrôleur de puissance qui lui permet d'adapter la puissance de transmission de telle sorte, qu'elle puisse utiliser la quantité minimale et suffisante d'énergie pour atteindre un récepteur donné.

Dans nos travaux de recherches on adopte la transmission en espace libre comme modèle de propagation. Le canal de propagation est supposé symétrique, ce qui signifie que le coût de transmission d'un message d'un nœud A vers un nœud B est identique à la transmission du nœud B vers le nœud A.

V.6.2. Le concept de la contribution

Dans notre contexte, la chaîne formée par les nœuds de capteurs symbolise la connectivité du réseau. D'où, notre intérêt que nous exprimons à travers notre présente contribution par le protocole ELMDG afin, d'élaborer une technique de collecte efficace des données qui vise à maximiser la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil. Son concept est fondé sur un principe écoénergétique de collecte des données.

Le fonctionnement de notre protocole ELMDG [114] proposé sera ainsi décrit comme suit :

- On débute par une phase d'initialisation afin de trouver la chaîne de longueur minimale qui contient l'ensemble "N" des nœuds pour engager le réseau en entier ;
- La phase de collecte de données à travers le réseau commence donc après la formation de la chaîne et la transmission des données sur la chaîne est débutée à partir des deux nœuds à ses extrémités.
- Comme dans PEGASIS, au cours de chaque période de transmission, chacun des nœuds de la chaîne reçoit un paquet de données de son voisin sur la chaîne et il l'agrège avec sa propre collecte pour transmettre le nouveau paquet formé vers le nœud suivant dans la chaîne. Ce processus continue progressivement, jusqu'à atteindre le nœud leader.
- A chaque période de transmission de données, un nœud leader est sélectionné pour recevoir les paquets de données transmis successivement sur la chaîne des nœuds pour qu'il les envoie en un seul saut après agrégation vers la station de base. Une simple transmission de balise initiée par le leader de la chaîne peut être envisagée pour organiser la transmission des données

Notre idée propose donc, une phase d'initialisation qui consiste à l'amélioration de la façon de former la chaîne de transmission constituée par l'ensemble des nœuds du réseau. Et ce, afin d'aboutir à une structure en chaîne dont la longueur doit être la plus minimale possible. Ce qui impactera positivement les réserves énergétiques du réseau.

Cette conception est différente de celle du protocole PEGASIS. Puisque la structure en chaîne selon ce dernier ne tient pas compte de la longueur de la chaîne mais, exige uniquement de

commencer sa formation à partir, du nœud le plus éloigné de la station de base afin, de connecter tous les nœuds déployés. Ceci, ne permet pas de fournir forcément la chaîne la plus courte.

A partir de là, il est par conséquent évident, d'avoir la longueur la plus courte possible de la structure en chaîne qui unie tous les nœuds de capteurs du WSN. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur le concept de l'algorithme de Dijkstra [113]. En effet, la construction de la chaîne la plus courte que nous avons réalisé résulte d'une comparaison qui implique tous les nœuds du réseau.

Autrement dit, on commence la formation d'une chaîne "Ci" en engageant l'ensemble des nœuds du réseau, à partir de chaque nœud "i". Puis, on détermine la longueur de chaque chaîne "Ci" en calculant la somme des longueurs des segments (distances) qui lient tous ses nœuds.

L'algorithme 5.1 suivant implémente les procédures de la phase d'initialisation du protocole ELMDG pour la formation de la chaîne de longueur minimale.

Algorithme 5.1 : Phase d'initialisation pour la formation de la chaîne de longueur minimale

- **Début**

1. Déployer aléatoirement "N" nœuds dans une superficie (M x M)
2. Etablir la liste E des "N" nœuds du réseau
3. **Pour** chaque nœud "i" du réseau :
4. → Initier une chaîne C
5. $C \leftarrow [i]$
6. $E \leftarrow E - [i]$
7. → **Tant que** E non vide
8. → Choisir $j \in E$ qui a la distance minimale à "i"
9. → $C \leftarrow C + [j]$
10. → $E \leftarrow E - [j]$
11. → $i \leftarrow j$
12. → **Fin de Tant que**
13. **Fin pour**
14. → Choisir la Chaîne de Longueur Minimale : CLM
15. → Diffuser cette chaîne

- **Fin**

Ensuite, sur toutes les chaînes obtenues, on choisit pour la transmission des données, celle qui a la longueur la plus minimale, c'est ce que nous appelons dans notre algorithme la Chaîne de Longueur Minimale "CLM"

Par ailleurs, dans le but de justifier et valider l'idée de base du protocole ELMDG proposé, nous avons dans un premier temps déployé des nœuds de capteurs d'une manière aléatoire dans une zone de superficie carrée.

Les chaînes formées selon les algorithmes de PEGASIS et celui qui permet de générer la chaîne la plus courte représentent en fait, des graphes dont les sommets symbolisent les nœuds et les arêtes les liens directs de communications entre les nœuds. La Figure 5.2 en est une illustration. C'est une juxtaposition de la chaîne des nœuds de capteurs formée selon le protocole PEGASIS, ainsi que la chaîne de longueur minimale construite à partir de ces mêmes nœuds.

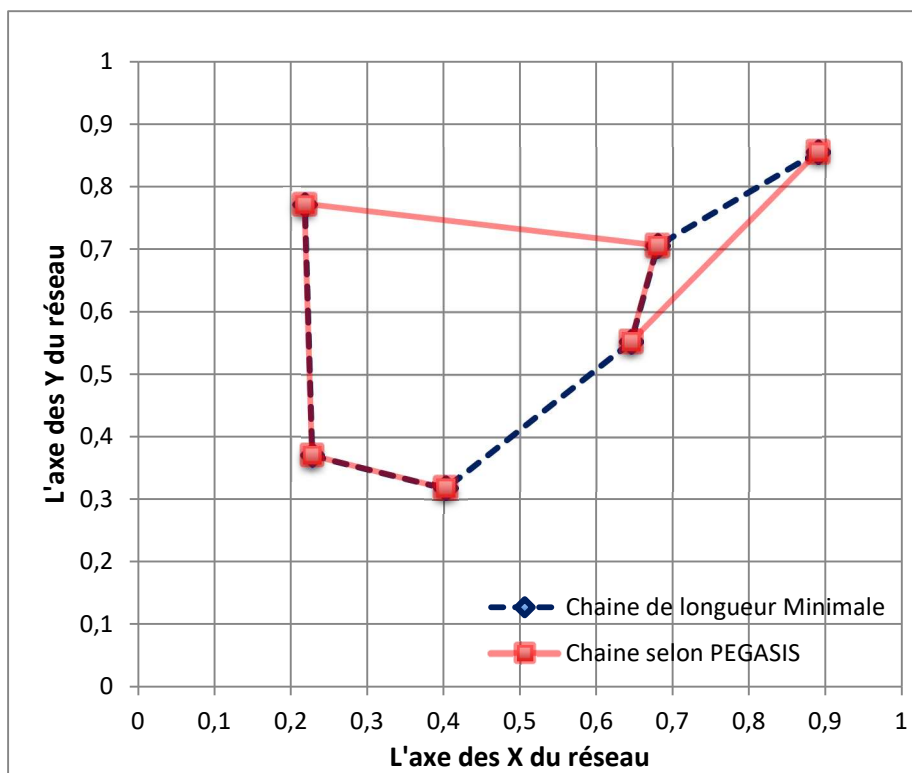


Figure 5.2 : Comparaison entre la chaîne transmission selon PEGASIS et la chaîne minimale

La comparaison des longueurs des chaînes formées par PEGASIS et celle dont la longueur est recherchée la plus minimale, indique que l'algorithme de PEGASIS possède bien la propriété d'être un protocole avide de part, la longueur plus grande de la chaîne formée.

Pour interpréter nos premiers résultats, sur le Tableau 5.1 on a relevé les distances entre les nœuds successivement sur la chaîne des nœuds de capteurs formée selon l'algorithme de PEGASIS. Puis, nous avons calculé la somme de ces distances pour trouver la longueur de la chaîne des nœuds formée.

Ensuite sur le Tableau 5.2 nous avons représenté les données générées par l'algorithme qui permet d'avoir la chaîne la plus courte. De celles-ci, nous avons de même déduit la longueur de cette chaîne.

Distance entre A et B	Distance entre B et C	Distance entre C et D	Distance entre D et E	Distance entre E et F	Longueur de la chaîne PEGASIS
0,18223567	0,40162401	0,46668004	0,15755706	0,39099161	1,5990884

Tableau 5.1 : La chaîne des nœuds de capteurs selon PEGASIS

Distance entre A' et B'	Distance entre B' et C'	Distance entre C' et D'	Distance entre D' et E'	Distance entre E' et F'	Longueur de la chaîne CLM
0,40162401	0,18223567	0,33733236	0,15755706	0,25904188	1,33779099

Tableau 5.2 : La chaîne des nœuds de capteurs de longueur minimale CLM

En effet, l'analyse de la Figure 5.2 et des Tableaux 5.1 et 5.2 nous révèle que la chaîne formée par PEGASIS possède une longueur d'environ 19,5% de plus que la chaîne minimale établie. Ce qui signifie que le protocole PEGASIS enregistre un long temps de livraison de données en plus, il consomme une énergie plus importante que lorsqu'on utilise une chaîne de longueur minimale.

Ceci, s'explique par le fait, que selon le modèle énergétique adopté [68], on considère que l'énergie de transmission est proportionnelle au carré de la distance entre deux nœuds communicants. Ce qui génère par conséquent, un surplus d'environ 47.43% d'énergie qui est perdue par rapport à l'utilisation de la structure en chaîne avec une longueur minimale.

D'où, l'intérêt manifesté dans notre protocole ELMDG pour rechercher au préalable dans le réseau, une structure en chaîne qui le représente et qui prend en considération tous les nœuds déployés, afin de former une chaîne de nœuds de capteurs dont la longueur est la plus minimale possible.

Ensuite, la phase de transmission des données sur la chaîne CLM formée est entamée. L'algorithme 5.2 illustre les transmissions comme prévu selon notre protocole ELMDG

Algorithme 5.2 : Phase de transmission dans le protocole ELMDG

- **Début**
 - 1. **Répéter Pour** chaque tour "r" de transmission
 - 2. → $LC = 1+r \text{ mod } N$
 - 3. → Effectuer les transmissions et agrégation des données en commençant des extrémités de la CLM vers LC
 - 4. → Transmettre vers la BS
 - 5. **Tant que** nœuds vivants
 - **Fin**
-

Or, puisque le nœud leader LC consomme plus d'énergie par rapport aux autres nœuds et dans l'objectif de distribuer la charge énergétique, il faut qu'à chaque période de transmission un nouveau nœud est sélectionné pour être le leader de la chaîne.

Aussi, si un nœud du réseau "meurt" la station de base relance l'algorithme 5.1 pour reconstituer une nouvelle chaîne de longueur minimale.

V.7. Simulation et résultats :

Dans ce qui a précédé nous avons pris en considération l'impact de la longueur de la chaîne formée par les nœuds de capteurs qui composent le WSN, afin de, de permettre une meilleure collecte et agrégation des données recueillies de l'environnement des WSN.

Ensuite, notre intérêt dans cette partie porte sur une étude paramétrique relative à l'influence de certaines métriques sur la maximisation de la durée de vie des réseaux. Et ce, à travers des simulations réalisées sous Matlab pour évaluer les performances de notre protocole ELMDG.

Nous avons considéré pour réaliser nos recherches une zone carrée sur laquelle sont déployés "N" nœuds de manière aléatoire et après leur déploiement ces nœuds sont statiques.

Les nœuds étant homogènes et ils sont dotés de capacités de calcul et de communication similaires. Au moment du déploiement, les niveaux d'énergie des nœuds de capteur sont équivalents.

Les valeurs des paramètres utilisés dans ce travail sont données dans le Tableau 5.3 suivant :

Type	Description	Symbole	Valeur
Réseau	Dimension du réseau	$X_m * Y_m$	$(100 \times 100) \text{ m}^2$
	Nombre des nœuds du réseau	N	10 - 200
	L'énergie initiale de chaque nœud	E_i	0.5 J
Application	Longueur du paquet de données	L	2500 bits
Modèle Radio	Energie électronique par bit	E_{elec}	50nJ/bit
	Energie de l'amplificateur	ϵ_{fs}	100pJ/bit.m ²

Tableau 5.3: Valeurs des paramètres de la phase d'initialisation et de simulation

Pour la représentation des résultats obtenus à partir des simulations que nous avons exécuté, on retient les valeurs moyennes des relevés obtenus.

V.7.1. Nombre nœuds et la durée de vie du réseau

La notion de la densité des nœuds de capteurs est une caractéristique inhérente et importante au niveau des WSN et elle est liée entre autres à l'efficacité énergétique, ainsi qu'aux autres particularités de ces réseaux. Autrement dit, il s'agit en réalité de l'impact du nombre nœuds dans le réseau : déployés, redéployés et opérationnels.

Afin d'estimer, l'évolution de la durée de vie du réseau en fonction de la variation du nombre de nœuds dans le WSN, on a exécuté notre algorithme ELMDG proposé et celui de PEGASIS.

Pour ce faire, on a localisé la station de base à la position (50m, 200m) et on a doté chacun des nœuds de capteurs d'une énergie initiale qui est équivalente à 0.5 J. Ensuite, on a modifié le nombre des nœuds du réseau dans l'intervalle variant de 10 à 300 nœuds.

Comme notre intérêt porte sur la durée de vie du réseau, nous nous sommes donc focalisés sur la durée de fonctionnement que le réseau peut assurer jusqu'à l'épuisement de l'énergie d'un premier nœud. La Figure 5.3 présente les résultats de simulation obtenus.

A titre d'exemple, lorsque le nombre de nœuds est d'environ 200 on arrive à réaliser une extension de la durée de vie du réseau qui est estimée à 30% approximativement.

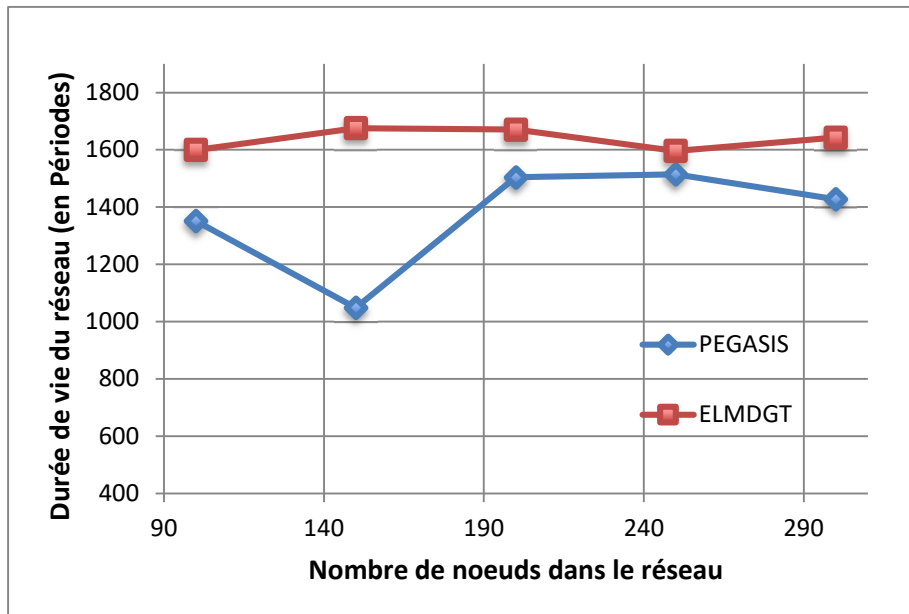


Figure 5.3 : Durée de vie du réseau WSN en fonction du nombre des nœuds.

En effet, à partir des allures des protocoles utilisés, on constate que notre protocole se comporte mieux par rapport à PEGASIS avant que le premier nœud meure. Ainsi, la durée de vie du réseau est améliorée, ce qui permet de préserver plus longtemps le fonctionnement du réseau.

V.7.2. Effet de la localisation de la station de base sur la durée de vie du réseau

Un des paramètres importants qui impacte aussi la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil étant la distance entre les nœuds du réseau et la station de base. C'est ce qui a motivé notre orientation dans cette seconde évaluation, pour laquelle, nous nous sommes intéressés à l'effet de la localisation de la station de base sur la durée de vie du réseau.

On a considéré un réseau composé d'un ensemble de 100 nœuds de capteurs déployés aléatoirement dans une zone d'intérêt. La batterie de chaque nœud est chargée initialement par une quantité d'énergie qui vaut 0.5J.

Dans cette exploration, on a procédé par déplacer la localisation de la station de base sur l'axe des ordonnées (Y). Ce déplacement s'est situé entre les points suivants : $(0.5X_m, 0.5Y_m)$ jusqu'à $(0.5X_m, 3Y_m)$. La Figure 5.4 montre les résultats de cette simulation.

On déduit à partir de la lecture des résultats obtenus que notre technique ELMDG assure une nette extension de la durée de vie du réseau par rapport au protocole PEGASIS, lorsque les positions de la station de base changent.

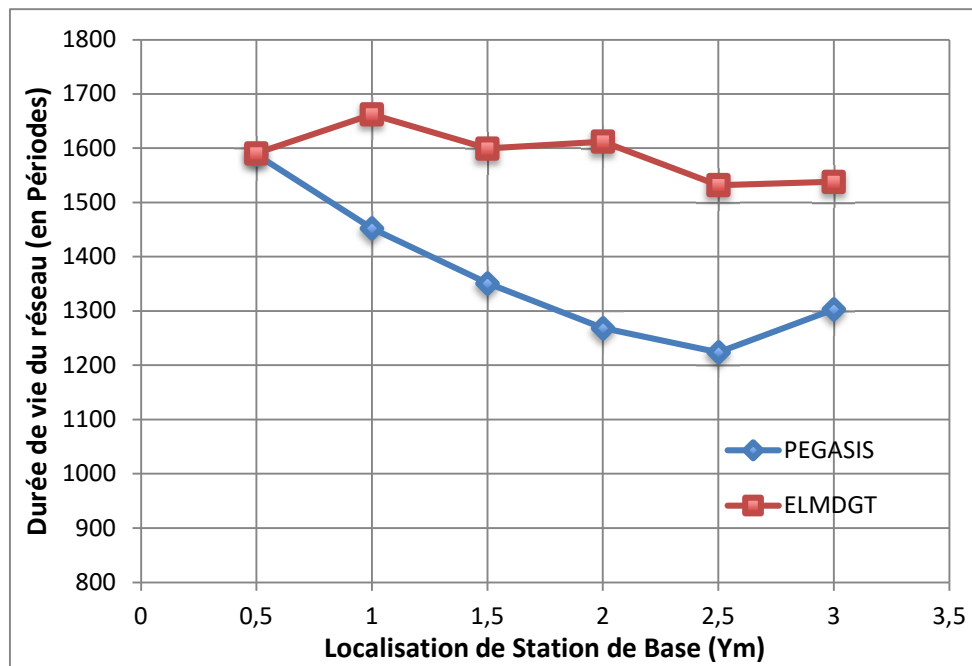


Figure 5.4 : Impact de la localisation de la station de base sur la durée de vie du réseau.

Également, les deux allures relatives à ELMDG et PEGASIS sur la Figure 5.4 indiquent que la durée de vie du réseau tend à diminuer quand la station de base s'éloigne de la zone d'intérêt. C'est une constatation qui se justifie par le fait, que l'énergie de transmission consommée par le nœud leader augmente avec l'éloignement de la station de base.

V.7.3. Evolution de la durée de vie en fonction de l'énergie initiale des nœuds

Nous avons considéré que la quantité de l'énergie initiale contenue dans les batteries des nœuds de capteurs est un paramètre aussi important à vérifier. Sur la Figure 5.5, on a une illustration de l'évolution de la durée de vie en fonction de l'énergie initiale des nœuds.

D'après les résultats obtenus, on peut constater que notre technique améliore la durée de vie du réseau pour différentes valeurs d'énergies initiales. Cette extension enregistre une croissance qui varie de de 17.2% à 29.7%.

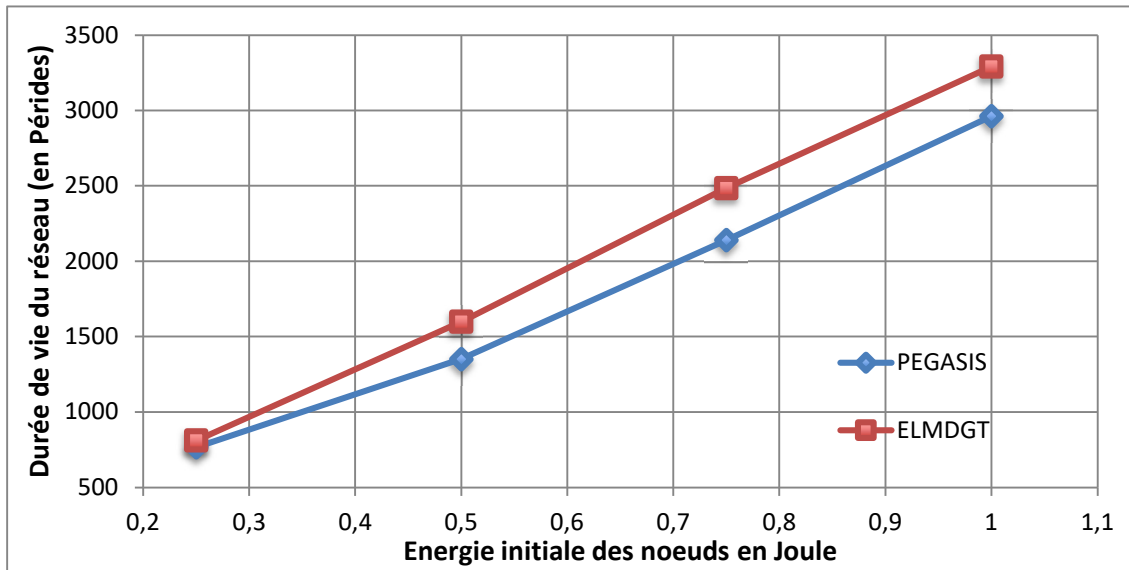


Figure 5.5 : Evolution de la durée de vie du réseau en fonction de l'énergie initiale des nœuds

Les graphes de la Figure 5.5 montrent que notre technique améliore nettement la durée de vie du réseau par rapport au protocole de PEGASIS. Ceci, est réalisé grâce à la formation de la chaîne de longueur minimale.

V.8. Conclusion :

L'énergie disponible dans un nœud capteur est la clé déterminante pour la conception et le fonctionnement des WSN. Dans ce chapitre, nous avons présenté notre contribution ELMDG à travers, laquelle on a proposé une technique basée sur la formation d'une chaîne de nœuds qui englobe tous les nœuds du réseau à l'instar du protocole PEGASIS. Par ailleurs, on a introduit une autre dimension a distingué notre idée celle-ci, consiste à ce que la chaîne qui doit être formé soit de longueur la plus minimale possible. Sa comparaison avec celle formée par PEGASIS a bien montré son intérêt puisque dans le protocole PEGASIS la chaîne formée n'est pas forcément la plus courte. Le besoin d'avoir une chaîne de longueur minimale permet d'étendre la durée de vie du réseau en comparaison avec PEGASIS.

Et ce, même si certains nœuds jouant le rôle de leader sont amenés à augmenter leur portée de transmission, ce qui se traduit par l'augmentation de leur propre consommation énergétique en vue, de minimiser la consommation globale du réseau. C'est une situation qui est justifiée et tolérable du fait, que seulement un nœud par tour est choisi comme leader pour effectuer des transmissions en un saut et qui peuvent être de longues distances vers la station de base.

L'extension de la durée de vie du réseau est vérifiée à travers une évaluation paramétrique relative à la variation du nombre de nœuds, à la position de la station de base par rapport au

réseau et aussi pour des quantités différentes des énergies initiales des nœuds de capteurs formant le réseau. L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre nous montre les bonnes performances de notre technique ELMDG

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (ou WSN) ont été rapidement adoptés dans une large gamme d'applications, allant de la surveillance médicale continue dans les domaines de la santé aux infrastructures industrielles automatisées, jusqu'aux environnements hostiles où, ils ont leur faculté d'opérer efficacement. De par, ce caractère ubiquitaire, ils ont commencé à avoir de plus en plus un impact majeur aussi bien sur l'environnement que sur d'autres domaines tels que les finances et la société.

Un WSN est décrit sommairement en tant qu'un réseau de nœuds de capteurs répartis dans l'espace et pouvant recevoir des informations, afin d'opérer et d'interagir avec leur environnement. Ils capturent, traitent, affichent et transmettent des informations sous formes de signaux spécifiques et selon un protocole de communication défini et reconnu. Fondamentalement, le fonctionnement d'un réseau de capteurs sans fil est une structure articulée autour de l'établissement de liaisons physique et logique entre le phénomène à détecter et l'utilisateur. Il s'agit de la mise en réseau des activités des éléments suivants : les nœuds capteurs, le phénomène à observer et son événement, l'application utilisé par l'utilisateur et la stratégie de déploiement.

On rappelle aussi, que la conception des WSN est soumise à certaines particularités tels que les ressources limitées des capteurs (en alimentation énergétique, traitement, puissance de calcul et mémoire), la capacité de coopération entre le grand nombre de nœuds du réseau, l'auto-organisation, les communications sans fil à courte portée, les topologies différentes et changeantes des WSN provoquées par l'épuisement des batteries, les défaillances des capteurs ainsi qu'aux perturbations environnantes. Néanmoins, certains des principaux défis techniques liés à la conception et au déploiement des réseaux de capteurs sans fil, concernent leurs exigences en matière de la fiabilité des communications et de la consommation d'énergie.

Bien évidemment, à partir de là, le caractère opérationnel et fonctionnel des WSN dépend essentiellement d'une contrainte fondamentale et intrinsèque à savoir : l'énergie contenue dans les batteries de nœuds et sa gestion.

Afin de relever ces défis corrélés et inhérents aux WSN, notre thèse a proposé de nouvelles conceptions des schémas relatifs aux protocoles de routage des paquets de données dans ces réseaux. Les techniques étudiées sont présentées et évaluées dans le contexte de l'amélioration de l'efficacité et l'efficacité des WSN qui se veulent être des réseaux multi technologies.

Ceci, en tenant compte de la préservation du compromis entre la fiabilité des communications et l'efficacité énergétique, ce qui permet d'assurer une durée de vie maximale des nœuds de capteurs et par la suite du réseau en entier.

Puisque, l'énergie est un critère fondamental de performance dans les réseaux de capteurs sans fil, nous avons estimé dans notre première contribution appelée CTEB, que tous les nœuds du réseau doivent savoir la répartition de leur énergie qui sera consommée pour les différentes transmissions. Notre approche, nous l'avons développée sur la base du protocole de routage hiérarchique LEACH.

En effet, pour permettre une meilleure exploitation de l'énergie des nœuds, nous avons proposé une technique de mise en cluster basée sur l'équilibrage de la charge énergétique sur tout le réseau. Ce schéma énergétique doit être diffusé par la station de base au préalable à l'ensemble des nœuds du réseau. Ceci, a permis de réaliser une bonne régulation de la consommation de l'énergie lors des transmissions des données et aboutir ainsi, au prolongement de la durée de vie de manière équitable au niveau de tous les nœuds, tout en préservant la couverture et la connectivité.

Ce mécanisme simple et efficace que nous avons établi, garanti une extension de la durée de vie du réseau valable pour plusieurs tours de transmission et pour différents nombres de nœuds et de niveaux d'énergies initiales dans ces derniers. Les résultats de la simulation montrent clairement l'amélioration apportée par notre technique CTEB par rapport au protocole LEACH qui est bien connu dans les systèmes de mise en cluster dans les réseaux de capteurs sans fil.

Dans un deuxième temps, nous avons poursuivi notre travail sur les problèmes liés à la consommation énergétique dans les WSN et nous nous sommes intéressés à un autre protocole de routage PEGASIS. A partir duquel, nous avons proposé un mécanisme de routage qui se base sur la formation d'une chaîne de nœuds pour la transmission de données dans le réseau. En effet, pour la maximisation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil nous avons proposé un protocole que nous avons appelé "Efficient Lifetime Maximization Data Gathering technique for routing in wireless sensor networks" (ELMDG) et qui se base sur une technique

efficace de collecte de données dont le fondement est articulé autour de la création d'une chaîne de nœuds de données de longueur minimale.

Le développement de notre technique ELMDG a permis de garantir une solution meilleure que celle retenue par PEGASIS pour prolonger la durée de vie du réseau. Les résultats de la simulation ont dévoilé et approuvé nettement le perfectionnement et l'optimisation de la durée de vie assurée par notre technique comparée au protocole de routage PEGASIS. En effet, seul le leader de la chaîne (le nœud principal) effectue une longue transmission vers la station de base. Ceci, tout en veillant à ce que la chaîne de nœuds formée soit courte. L'exploitation de notre proposition est possible et efficace en termes de variation du nombre de nœuds dans le WSN, de la localisation de la station de base et notamment lorsque les énergies initiales sont différentes.

Pour que les réseaux de capteurs sans fil puissent délivrer tous leurs potentiels, de nombreux problèmes de recherche et d'ingénierie peuvent être traités et résolus. Ainsi, nous estimons qu'à l'avenir, on pourra poursuivre de nouvelles recherches en vue, d'exploiter la diversité des opportunités prometteuses dans ce contexte.

Dans cette même lignée de travaux de recherche, on a pu constater à travers la littérature scientifique que la plupart des efforts de recherche existants traitent des fluctuations des conditions d'exploitation (acquisition, transmission, traitement, QoS, ...), afin de fournir des informations avec la qualité spécifiée la plus élevée possible. En revanche, il existe un aspect isolé très peu étudié dans les recherches au niveau des WSN qui est la qualité de l'information (QoI). Actuellement, la QoI est abordée en se concentrant sur des opérations de traitement discret de données, tels que la collecte des données brutes, le traitement en réseau (compression, agrégation), le transport d'informations et les opérations au niveau de la station de base (la prise de décision).

L'examen en perspective de cet aspect pourra dévoiler d'autres attributs, métriques et opérations fonctionnelles des réseaux de capteurs sans fil.

Certains termes récents utilisés pour décrire les réseaux de capteurs sans fil modernes sont : Internet of Things (IoT) ou Internet of Everything (IoE). Ces termes reflètent le potentiel et l'ampleur de cette technologie dans un avenir proche, avec des impacts très importants, permettant de nouveaux services et applications grâce à la grande conquête des réseaux de capteurs sans fil. Dans [117] on a estimé que le potentiel de l'impact économique, y compris le surplus des consommateurs, pourrait atteindre 11 100 milliards de dollars par an en 2025 pour les applications IoT dans des contextes très variés.

Pareillement, d'autres perspectives concernent en particulier, le bloc d'acquisition des signaux. Ce bloc est aussi essentiel que celui de la transmission dans la vie des réseaux de capteurs sans fil. L'optimisation de leurs performances pourrait avoir un effet significatif sur l'ensemble du système.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. Park M.B. Srivastava V. Raghunathan, C. Schurgers. Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(2):40-50, 2002.
- [2] E. Shih, S. H. Cho, N. Ickes, R. Min, A. Sinha, A. Wang, A. Chandrakasan. Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks. *Proc. ACM SIGMOBILE 7/01*, 272-286, Rome, Italy 2001
- [3] I. F. Akyildiz, Tommaso Melodia, Kaushik R. Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 51:921-960, 2007.
- [4] Shuang-Hua Yang. *Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications*. Springer-Verlag London 2014
- [5] R. Mahmoudi, K. Iniewski *Low Power Emerging Wireless Technologies*. CRC Press. 2013
- [6] M. Daoud. Recherche d'Information Contextuelle. *Rencontres Inter Association (RIA's) mars 2007*
- [7] T. Znati K. Sohraby, D. Minoli. *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [8] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, (8), 102-114, 2002.
- [9] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Micro-sensor Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 1(4), 660-670. October 2002.
- [10] N. Xu. A survey of sensor network applications. *IEEE Communications Magazine*, 40, 2002.

- [11] A. Chandrakasan, R. Amirtharajah, S.-H. Cho, J. Goodman, G. Konduri, J. Kulik, W. Rabiner, A. Wang. Design considerations for distributed micro-sensor systems, Proceeding IEEE 1999 Custom Integrated Circuits Conference (CICC'99), San Diego, CA, USA, 279-286
- [12] S. Mueller, P. Tsang, D. Ghosal. Multipath Routing in Mobile Ad hoc Networks: Issues and Challenges. Performance Tools and Applications to Networked Systems:209-234, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [13] Y. Zatout, E. Campo, J. Libre. Toward hybrid WSN architectures for monitoring people at home. International ACM Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems, MEDES, Lyon, France, October 2009
- [14] G. C. M. Meijer. Smart sensor systems. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2008
- [15] M. Gortz, R. Ackermann, J. Schmitt, R. Steinmetz. Context-aware communication services: A framework for building enhanced IP telephony services. In International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN): 535–540, 2004.
- [16] F. Berthier. Conception d'un processeur ultra basse consommation pour les nœuds de capteurs sans fil. Réseaux et télécommunications. Université Rennes 1, décembre 2016.
- [17] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal. Wireless sensor network survey. Computer Networks, Vol. 52:2292-2330, Elsevier 2008.
- [18] L. Yong-Min, W. Shu-Ci, N. Xiao-Hong. The Architecture and Characteristics of Wireless Sensor Network. Computer Technology and Development, 2009. ICCTD '09. International Conference, Vol. 1, 561–565, 2009.
- [19] Q.Wang, I. Balasingham. Wireless Sensor Networks - An Introduction. DOI: 10.5772/13225. InTech, December 2010
- [20] L. T. Nguyen, X. Defago, R. Beuran, Y. Shinoda. An Energy Efficient Routing Scheme for Mobile Wireless sensor Networks. IEEEISWCS, 568-572, 2008
- [21] L. Ruizhong, W. Zhi, S. Youxian, Energy efficient medium access control protocols for wireless sensor networks and its state-of-art. Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium: 669-Q74 Vol. 1, 2004
- [22] Edgar H. Callaway Jr. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols. CRC Press,2004
- [23] J. Fernández-Berni, R. Carmona-Galán, Á. Rodríguez-Vázquez. Low-Power Smart Imagers for Vision-Enabled Sensor Networks. DOI 10.1007/978-1-4614-2392-8_6. Springer Science+Business Media New York. 2012

- [24] D. Estrin, L. Girod, G. Pottie, M. Srivastava. Instrumenting the world with wireless sensor networks. Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2001), Salt Lake City, Utah, USA, Vol. 4, 2033-2036, 2001
- [25] Y. Yao, J. Gehrke, The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. ACM SIGMOD Record, 31(3):9–18, 2002
- [26] Habib M. Ammari. The Art of Wireless Sensor Networks: Fundamentals, Vol. 1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014
- [27] Habib M. Ammari. The Art of Wireless Sensor Networks: Advanced Topics and Applications, Vol. 2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014
- [28] S. Kim, S.Pakzad, D.Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser, M. Turon. Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks. IPSN '07 Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks: 254-263. Cambridge, Massachusetts, USA, April 25 - 27. ACM New York, USA 2007
- [29] G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Ruiz, O. Marcillo, J. Johnson, J. Lees, M. Welsh. Deploying a Wireless Sensor Network on an Active Volcano. IEEE Internet Computing, Vol.10, Issue: 2, March-April 2006
- [30] M. Ilyas, I. Mahgoub. Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems. CRC Press LLC, 2005.
- [31] A. Dunkels, B. Grönvall, T. Voigt. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In Proceedings of IEEE EmNets'04, Tampa, Florida, USA, 2004.
- [32] F. Mieleveville, M. Ichchou, G. Scorletti, D. Navarro, W. Du. Wireless Sensor networks for active vibration control in automobile structures. Smart Materials and Structures, Vol. 21. IOP Publishing, 2012.
- [33] M. K. Marina, S. R. Das, On-demand Multipath Distance Vector Routing in Ad hoc Networks. Proceedings of the International Conference for Network Procotols (ICNP), 14-23, 2001.
- [34] S. J. Lee, M. Gerla, Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Vol. 10, 3201-3205, 2001.
- [35] G. Pottie, W. Kaiser. Wireless integrated network sensors. Communication of ACM 43 (5): 51–58. 2000
- [36] I. F. Akyildiz, M. C. Vuran. Wireless Sensor Networks. John Wiley & Sons, Inc. 2010
- [37] C.S. Raghavendra, K.M. Sivalingam, T. Znati, Wireless sensor networks. Springer 2006.
- [38] J. Fraden, Handbook of modern sensors: Springer, 2010

- [39] T. Rault, A. Bouabdallah, Y. Challal. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. *Compute. Networks.*, Vol.67, no.7, 104-122, 2014
- [40] F. Luo, C. Jiang, H. Zhang, X. Wang, L. Zhang, Y. Ren. Node Energy Consumption Analysis in wireless Sensor Networks. *Proceeding IEEE 80th Vehicular Technology Conference*, Vancouver, BC, Canada, 1-5, 2014
- [41] N.A. Pantazis, S.A. Nikolidakis, D. D. Vergados. Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol.15, no.2, 551-591, 2013.
- [42] W. Rehan, S. Fischer, M. Rehan. A Critical Review of Surveys Emphasizing on Routing in Wireless Sensor Networks - An Anatomization under General Survey Design Framework. *Sensors*, Vol.17, no.8, 1-37, 2017
- [43] I. F. Akyildiz, I. H. Kasimoglu. Wireless sensor and actor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 2(4), 351-367, 2004
- [44] J. M. Kahn, R. H. Katz, K. S. J. Pister. Next century challenges: Mobile networking for "smart dust". In *International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*:271-278, 1999.
- [45] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. *Proceedings of the sixth annual international conference on Mobile computing and networking*, 56-67, Boston, MA USA, 2000.
- [46] I. F. Akyildiz, W. SU, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, Wireless sensor networks: a survey. *Elsevier Computer Networks Journal*, 38(4):393-422, mars 2002.
- [47] M. A. Labrador, P. M. Wightman. *Topology Control in Wireless Sensor Networks with a companion simulation tool for teaching and research*. Springer, 2009.
- [48] A. Giuseppe, C. Marco, D. F. Mario, P. Andrea, Energy Conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Network.*, Vol.7, no.3,537-568, May. 2009.
- [49] Y. Zatout, E. Campo, J. Llibre. WSN-HM: Energy-Efficient Wireless Sensor Network for Home Monitoring. *International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, Melbourne, Australia, December 2009.
- [50] W. Charfi, M. Masmoudi, F. Derbel, A layered model for wireless sensor networks. *Systems. Signals and Devices, SSD '09. 6th International Multi-Conference*, 1-5, 2009
- [51] N. Noury, T. Herve, V. Rialle, G. Virone, E. Mercier, G. Morey, A. Moro, T. Porcheron, Monitoring behavior in home using a smart fall sensor. *IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology*, October 2000.

- [52] M.G. Di Benedetto. *Uwb Communication Systems: A Comprehensive Overview*. Hindawi Publishing, 2006
- [53] I. F. Akyildiz, T. Melodia, K. R. Chowdury, *Wireless multimedia sensor networks: A survey*. *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 14, 32-39, 2007.
- [54] Lewis, F.L. *Smart environments: Technology, protocol and applications*. In: Cook, D.J., Das, S.K. (eds.) *Wireless Sensor Networks*. 13–46. Wiley, New York (2004)
- [55] A. Tavakoli, K. Srinivasan, P. Dutta, P. Levis. *An empirical study of low-power wireless*. *ACM Transactions on Sensor Networks*. 6(16) :1- 49, 2010.
- [56] Y. Wang, C. Hu, Y. Tseng. *Efficient placement and dispatch of sensors in a wireless sensor network*. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(2), 262-274, 2008.
- [57] G. Hoblos, M Staroswiecki, A. Aitouche. *Optimal design of fault tolerant sensor networks*. *Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications*. 467-472, 2000
- [58] L. Paradis, Q. Han. *A Survey of Fault Management in Wireless Sensor Networks*. *Journal of Network and Systems Management*, Springer Science Business Media, LLC. 2007
- [59] F. Koushanfar, M. Potkonjak, A. Sangiovanni-Vincentell. *Fault Tolerance Techniques for Wireless Ad Hoc Sensor Networks*. *Proceeding of IEEE Sensors*, Vol.2, 1491-1496, 2002.
- [60] M.Aboelaze, F.Aloul, *Current and future trends in Sensor Networks: A survey*. *IEEE*, 2005
- [61] M. Younis K. Akkaya. *A survey on routing protocols for wireless sensor networks*. *Ad hoc networks*,3(3), 325-349, 2005
- [62] L. Frye, L. Cheng, S. Du, M.W. Bigrigg. *Topology maintenance of wireless sensor networks in node failure-prone environments*. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, 886-891. Piscataway, NJ, USA: IEEE 2006.
- [63] S. Gupta1, KC. Roy. *Comparison of Sensor Node Scheduling Algorithms in Wireless Sensor Networks*. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol.02 Issue: 06, 2015.
- [64] W. Dargie, C. Poellabauer, *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*. *Wiley Series on Wireless Communications and Mobile Computing*. John Wiley & Sons. 2010
- [65] S. Andrew Tanenbaum, J. David Wetherall. *Computer Networks*. 5^{ème} edition, Pearson Education, Inc. Prentice Hall, sept. 2010
- [66] V. Shnayder, M. Hempstead, B. Chen, G. W. Allen, M. Welsh. *Simulating the Power Consumption of Large-Scale Sensor Network Applications*. *SenSys'04*, November 3–5, 2004, ACM 1581138792/04/001, USA. 2004

- [67] A. Prayati, C. Antonopoulos, T. Stoyanova, C. Koulamas, G. Papadopoulos, A modeling approach on the TelosB WSN platform power consumption. *The Journal of Systems and Software* 83 (2010) 1355–1363
- [68] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS '00, Vol. 8, 8020-8013, 2000*
- [69] P. Santi, *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. Hardcover, 2005.
- [70] W. Hu, C.T. Chou, S. Jha, N. Bulusu. Deploying long-lived and cost-effective hybrid sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 4, 749-767, 2006 - Elsevier
- [71] L. Frye, L. Cheng, S. Du, M. W. Bigrigg. Topology maintenance of wireless sensor networks in node failure-prone environments. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. Piscataway, NJ, USA: IEEE. 886-891. 2006
- [72] H. Cao, V. Leung, C. Chow, H. Chan. Enabling Technologies for Wireless Body Area Networks: A Survey and Outlook. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47, Issue 12, 84-93, December 2009
- [73] R. Rohankar, C. P. Katti, S. Kumar. Comparison of Energy Efficient Data Collection Techniques in Wireless Sensor Network. *3rd International Conference on Recent Trends in Computing 2015 (ICRTC-2015)*, *Procedia Computer Science* 57, 146 – 151. Elsevier 2015
- [74] S. Ziane, A. Mellouk. A swarm intelligent scheme for routing in mobile ad networks. *Systems Communications*, IEEE, Aug 2005.
- [75] Al-Karaki, Jamal N., Ahmed E. Kamal. Routing techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey. *Wireless Communications*, IEEE 11.6; 6-28, 2006
- [76] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella, How to prolong the lifetime of wireless sensor networks. M. Denko, L. Yang (Eds.), *Mobile Ad hoc and Pervasive Communications*, American Scientific Publishers, 2006
- [77] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco, A. Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey., *Ad Hoc Networks*, 7, 537-568, Elsevier, 2009
- [78] J.Yrjola. Summary of Energy Efficiency Communication Protocol for Wireless Micro Sensor Networks. *Seminar on Theoretical Computer Science. Algorithmics of Sensor Networks*. Spring 2005
- [79] Y. Busnel. *Système d'information pair-à-pair pour les réseaux de capteurs larges échelles*. Lettre de la fondation Metivier, Fondation Metivier, 2006.
- [80] S. Kumar, D. Shepherd, F. Zhao. Collaborative signal and information processing in micro-sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, March 2002.

- [81] S. Chong, M. Gaber, S. Krishnaswamy, S. Loke. Energy-aware data processing techniques for wireless sensor networks: a review. *Transactions on Large-Scale Data- and Knowledge-Centered Systems III, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6790*, 117-137, 2011.
- [82] B. Krishnamachari, D. Estrin, S. Wicker. The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. *International Workshop on Distributed Event-Based Systems (DEBS'02)*. Vienna, Austria, July 2002.
- [83] B. Przydatek, D Song, A. Perrig. Secure Information Aggregation in Sensor Networks. *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*. Los Angeles, Nov. 2003.
- [84] J. Ibriq, I. Mahgoub, Cluster-Based Routing in Wireless Sensor Networks: Issues and challenges. *Proceeding. of the 2004 Symposium on Performance Evaluation of Computer Telecommunication Systems*. 759-766. 2004
- [85] Y. Al-Obaisat, R. Braun. On Wireless Sensor Networks: Architectures, Protocols, Applications and Management. *International Conference on Wireless Broadband and Ultra-Wideband Communication (AusWireless)*, 2006
- [86] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, S. Kumar. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. *Proceeding 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)*, Seattle Washington, USA. 263-270. 1999
- [87] K. Young Jang, K. Tae Kim, H. Yong Youn, An Energy Efficient Routing Scheme for Wireless Sensor Networks. *Computational Science and its Application 2007.ICCSA 2007, International Conference on 26-29. IEEE Computer Society 2007*.
- [88] Q. Wang, H. Hassanein, G. Takahara, Stochastic Modelling of Distributed, Dynamic, Randomized Clustering Protocols for Wireless Sensor Networks. *Proceeding International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'04)*, 456-463. Canada, August 2004
- [89] S. Lindsey, C.S. Raghavendra. PEGASIS: Power efficient Gathering in Sensor Information System. *Proceedings IEEE Aerospace Conference, Vol. 3, Big Sky, MT, 1125-1130*. 2002
- [90]. A. Manjeshwar, D. P. Agrawal. TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, 2001*.
- [91] W. Lou, "An Efficient N-to-1 Multipath Routing Protocol in Wireless Sensor Networks", *Proceedings of IEEE MASS'05, Washington DC, 1-8, 2005*.

- [92] A. Manjeshwar D. P. Agrawal. APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks. Proceedings of the International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'02), IEEE 2002
- [93] R. Vidhyapriya, P.T. Vanathi..: Conserving energy in wireless sensor networks. IEEE Potentials 26 (5), 37–42. 2007
- [94] S. M. Hedetniemi, S. T. Hedetniemi, A. L. Liestman, “A Survey of Gossiping and Broadcasting in Communication Networks,” Networks, Vol. 18, No. 4, 319- 349, 1988
- [95] H. Park, W. Liao, K.H. Tam, M.B. Srivastava, L. He. A Unified Network and Node Level Simulation Framework for Wireless Sensor Networks - NESL Technical Report, 2003
- [96] D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, R. Morris. High-throughput path metric for multi-hop wireless routing. ACM MOBICOM, 2003.
- [97] R. Draves, J. Padhye, B. Zill, Routing in Multi-radio, Multi-hop Wireless Mesh Networks. Proceedings of the ACM MobiCom, 2004.
- [98] B. Hull, V. Bychkovsky, Y. Zhang, K. Chen, M. Goraczko, A. Miu, S. Madden. CarTel: A distributed mobile sensor computing system. Proceedings of ACM SenSys ACM. 2006
- [99] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01), Rome, Italy, July 2001.
- [100] G. Smaragdakis, I. Matta, A. Bestavros. Sep: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications, (SANPA 2004), 2004
- [101] L. Qing, Q. Zhu, M. Wang. Design of a distributed energy- efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks. Computer Communication (Elsevier), 29(12): 2230-2237, 2006.
- [102] Y. Chen, Q. Zhao. On the lifetime of wireless sensor networks. Communications Letters, IEEE, Vol. 9, no. 11, 976–978, 2005.
- [103] O. Zytoune, Y. Fakhri, D. Aboutajdine. A Novel Energy Aware Clustering Technique for Routing in Wireless Sensor Networks. Wireless Sensor Network, Vol. 2, n°3, 233-238, 2010.
- [104] O. Zytoune, Y. Fakhri, and D. Aboutajdine.” A fairly balanced clustering algorithm for routing in wireless sensor networks”. Sensor Review, Vol. 30, Issue 3. 2010.
- [105] M. M. Warriera, A.Kumarb. An energy efficient approach for routing in wireless sensor networks. Global Colloquium in Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology (RAEREST 2016). Procedia Technology 25, 520-527. Elsevier Ltd. 2016

- [106] A. Seetharam, A. Acharya, A. Bhattacharyya, M. K. Naskar. An Energy Data Gathering Protocol for Wireless Sensor Networks. *Journal of Applied Computer Science*, no.1(2), 30-34. 2008
- [107] Y. Chen, Q. Zhao. On the Lifetime of Wireless Sensor Networks. *IEEE communications letters*, Vol. 9, no. 11, 2005.
- [108] I. Dietrich, F. Dressler. On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, Vol. 5, No. 1, January 2009
- [109] H. A. Marhoon, M. Mahmuddin, S. A. Nor. Chain-based routing protocols in wireless sensor networks: a survey. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 10, no. 3, 2015.
- [110] F. Tang, I. You, S. Guo, M. Guo, Y. Ma. A chain-cluster based routing algorithm for wireless sensor networks. *J Intell Manuf* (2012) 23, 1305–1313, Springer Science+Business Media, LLC 2010
- [111] D. Evans. How the next evolution of the internet is changing everything. Cisco IBSG, 2011.
- [112] S. Ehlali, A. Sayah, A. A clustering technique based on energy balancing algorithm for routing in wireless sensor networks. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. Vol. 50, no. 1, 2013 (<http://www.jatit.org/volumes/Vol50No1/8Vol50No1.pdf>)
- [113] E. W. Dijkstra. Self-Stabilizing Systems in Spite of Distributed Control. *Communications of the Association of the Computing Machinery*, 643-644, 1974.
- [114] S. Ehlali, A. Sayah, A. Efficient lifetime maximization data gathering technique for routing in wireless sensor networks. *Applied Mathematical Sciences*, HIKARI. Vol. 8, no. 28, 1381-1389, 2014 (<http://dx.doi.org/10.12988/ams.2014.311661>)
- [115] D. Dondi, A. Bertacchini, D. Brunelli, L. Larcher, L. Benini. Modeling and optimization of a solar energy harvester system for self-powered wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, no. 7, 2759-2766, 2008
- [116] N.J. Guilar, T.J. Kleeburg, A. Chen, D.R. Yankelevich, R. Amirtharajah. Integrated solar energy harvesting and storage. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, Vol. 17, no. 5, 627-637, 2009.
- [117] J. Manyika, M. Chui, P. Bisson, J. Woetzel, R. Dobbs, J. Bughin, D. Aharon. *Unlocking the Potential of the Internet of Things*. McKinsey Global Institute, San Francisco, USA, 2015
- [118] S. Sharma, S.K. Jena. Cluster based multipath routing protocol for wireless sensor networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 45 N02 :14–20, April, 2015.

- [119] G. S. Arumugam, T. Ponnuchamy. EE-LEACH: development of Energy-Efficient LEACH protocol for data gathering in WSN. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol. 2015, no. 1, 76, 2015.
- [120] R. Jadoon, W. Zhou, W. Jadoon, I, Ahmed Khan. RARZ: Ring-Zone Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. Applied Sciences Vol.8, no. 1023. 2018.
- [121] P. Rajeshwari, B. Shanthini, M. Prince. Hierarchical Energy Efficient Clustering Algorithm for WSN. Middle-East Journal of Scientific Research 23 Sensing, Signal Processing and Security, 108-117, 2015.
- [122] S. Ehlali, A. Sayah, Energy Harvesting Technologies in Wireless Sensor Networks (EHT-WSN): A Review. Fifth International Symposium on Dielectric Materials and Applications (ISyDMA'5 Virtual Edition) on April 15-17 2020.

Résumé

Les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF) constituent une technologie potentiellement évolutive et ubiquitaire. C'est un système de communication sans fil constitué de minuscules nœuds capteurs capables d'acquérir des informations sur leur environnement. Ils suscitent beaucoup d'intérêt et leur rôle est décrit tel d'un middleware (Intergiciel) entre l'environnement à superviser et l'utilisateur. Quand ces nœuds sont déployés ils doivent rester opérationnels tout en préservant une durée de vie maximale du réseau. Notre thèse s'inscrit donc dans la démarche de l'efficacité énergétique, à travers des contributions aux solutions de routage pour l'optimisation de la gestion de l'énergie dans ces réseaux. Nous avons proposé dans une première approche prédictive, l'algorithme de routage CTEB qui repose sur celui du protocole LEACH et qui sera basé sur la génération d'une matrice de prédiction pour la répartition de l'énergie de chaque nœud dans le réseau, en vue d'un ordonnancement optimal et prévisionnel de l'activité des nœuds. Puis dans une seconde approche nous avons développé un algorithme de routage ELMDGT qui est une version améliorée de la version originale de PEGASIS et qui adopte la formation de la chaîne de nœuds la plus courte dans le réseau avant l'exécution du protocole de routage.

Mots-clefs (5) : Réseaux de Capteurs Sans Fil, Efficacité énergétique, Durée de vie, Protocole de Routage, Clustering

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) are a potentially scalable and ubiquitous technology. It is a wireless communication system made up of tiny sensor nodes capable of acquiring information about their surroundings. They arouse a lot of interest and their role is described as middleware between the environment to be monitored and the user. When these nodes are deployed they must remain operational while preserving maximum network lifespan. Our thesis is therefore part of the energy efficiency approach, through contributions to routing solutions for the optimization of energy management in these networks. In a first predictive approach, we have proposed the CTEB routing algorithm which is based on that of the LEACH protocol and which will be based on the generation of a prediction matrix for the distribution of the energy of each node in the network, in view of an optimal and predictive scheduling of node activity. Then in a second approach we developed an ELMDGT routing algorithm which is an improved version of the original version of PEGASIS and which adopts the formation of the shortest chain of nodes in the network before the execution of the routing protocol.

Key Words (5) : Wireless Sensor Networks, Energy Efficiency, Lifetime, Routing protocols, Clustering.