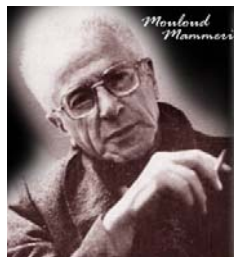


République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de Génie Électrique et d'Informatique

Département d'Informatique



Mémoire

De fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2 en Informatique spécialité SI

Thème

*Routage à économie d'énergie dans
les réseaux de capteurs sans fil.*

Proposé et dirigé par :

M^r TALBI Said

Réalisé et présenter par :

M^{elle} OUABDESSELAM Massissilia

Promotion 2011/2012

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon promoteur M^r Talbi S, pour son encadrement, sa disponibilité, sa positivité et sa motivation.

Un grand merci aussi à tous les Enseignants du département informatique.

Que les membres du jury trouvent ici mes remerciements les plus vifs pour avoir accepté d'honorer par leur jugement mon travail.

Mes sincères remerciements vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. En particulier ma chère famille et mes amies.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère

A mon père

A mon frère Hakim

A ma sœur Linda

*A toute ma famille qui m'a
toujours soutenue*

*A tous mes amis : Sabrina,
Lila, Linda, Aldjia, Lidia, Ghiles,
Kociela, Ali, Farid, Mohamed...*

*A toute la promotion LMD
2011/2012*

A l'UMMTO

Massissilia

Résumé

Les progrès technologiques réalisés ces dernières années, ont permis le développement de nouveaux types de capteurs dotés de moyens de communication sans fil, pouvant être configurés pour former des réseaux autonomes. Divers phénomènes peuvent être mesurés, tels que le son, les vibrations, l'humidité, la pression ou la température. Les domaines d'application sont nombreux : domotique, santé, militaire, environnementale ex. La petite taille des capteurs constitue, cependant, une limite importante, principalement, en terme de traitement, de stockage et surtout d'autonomie d'énergie et donc de durée de vie, car la batterie doit être très petite. C'est pourquoi, de nombreux travaux portent aujourd'hui sur la gestion de l'énergie consommée par les capteurs dans un réseau en prenant en considération, en premier lieu, les communications.

C'est dans ce but, que nous avons présenté une description de quelques protocoles de routages à économie d'énergie, en exposant leurs principes de fonctionnement. Par la suite nous nous sommes consacrée à la comparaison de trois protocoles DC (*Direct Communication*), MTE (*Minimum Transmission Energy*) et LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*). La simulation est utilisée comme outil d'évaluation de leurs performances.

La série de simulation menée sur ces protocoles nous a permis de prouver leur efficacité dans la réduction de l'énergie consommée par les nœuds capteurs, conduisant ainsi à une prolongation dans leur durée de fonctionnement et étendant la durée de vie du réseau.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, Consommation d'énergie, Protocole de routage.

Abstract

Technological advances during the last few years, allowed the development of new and cheap sensors with wireless communication, which can be configured to autonomous networks. Various phenomena can be measured, such as sound, vibration, humidity, pressure or temperature. The field of applications is very large: home automation, healthcare, military, environmental ex. However the small size of the sensors is an important limitation, in terms of processing, storage, especially energy autonomy, and lifetime because the battery is very small. That is why many works are now considering on the management of the energy consumed by the sensors in a network, especially communications energy.

It is for this purpose, we presented a description of some routing energy saving protocols, stating their operating principles. In the following we sum devoted to the comparison of three protocols DC (*Direct Communication*), MTE (*Minimum Transmission Energy*) and LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*). The simulation is used as a tool of evaluation of their performances.

The series of simulations conducted on these protocols allowed us to prove their effectiveness in reducing the energy consumed by sensor nodes, thus leading to an extension in their operating life and extending the lifetime of the network.

Keywords: wireless sensor networks, energy efficiency, routing protocol.

Sommaire

Liste des figures	VII
Liste des tableaux	VIII
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils	4
1.1 Introduction	5
1.2 Capteur	5
1.2.1 Définition d'un capteur	5
1.2.2 Architecture physique d'un capteur.....	6
1.2.3 Système d'exploitation d'un capteur	8
1.2.4 Caractéristique d'un capteur.....	9
1.3 Réseaux de capteurs	10
1.3.1 Définition d'un réseau de capteurs	10
1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs	11
1.3.3 Réseaux des capteurs vs des réseaux MANETs.....	11
1.3.4 Caractéristique d'un réseau de capteurs	12
1.4 Domaines d'application des réseaux de capteurs	15
1.5 Communication dans les réseaux de capteurs	17
1.5.1 Pile protocolaire (modèle en couche)	17
1.5.2 Technologie et standard de communication	20
1.6 Contraintes liées aux réseaux de capteurs	22
1.7 Quelque axe de travaux de recherche dans les WSN	24
1.8 Conclusion.....	26
Chapitre 2 : Protocoles de routages à basse consommation d'énergie	27
2.1 Introduction	28
2.2 Consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs.....	28
2.2.1 Energie de capture	28
2.2.2 Energie de traitement.....	28
2.2.3 Energie de communication	29
2.3 Facteurs intervenant dans la consommation d'énergie.....	29
2.3.1 Etat du module radio	29
2.3.2 Accès au médium de transmission	30
2.3.3 Classe d'application	32

2.3.4 Routage de données	32
2.4 Techniques de minimisation de consommation d'énergie	32
2.5 Routage dans les réseaux de capteurs.....	34
2.5.1 Facteurs pour le développement de protocole de routage	34
2.5.2 Métriques de mesure d'efficacité d'un protocole de routage	36
2.6 Classification des protocoles de routage	36
2.6.1 Classes principales des protocoles de routage	37
2.6.2 Sous-classes des protocoles de routage	39
2.7 Exemples de protocoles de routages dédiés aux WSN.....	41
2.7.1 SPIN (<i>Sensor Protocols for Information via Negotiation</i>)	41
2.7.2 DD (<i>Directed Diffusion</i>).....	42
2.7.3 MCFA (<i>Minimum Cost Forwarding Algorithm</i>)	45
2.7.4 RR (<i>Rumour Routing</i>)	46
2.7.5 LEACH (<i>Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>)	47
2.7.6 PEGASIS & Hierarchical-PEGASIS	48
2.7.7 TEEN & APTEEN	48
2.7.8 SAR (<i>Sequential Assignment Routing</i>).....	48
2.7.9 SPEED (<i>A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks</i>)	49
2.7.10 Classification des principaux protocoles de routages des WSN.....	50
2.8 Conclusion.....	50
Chapitre 3: Etude expérimentale	51
3.1. Introduction	52
3.2 Motivation	52
3.3 Les protocoles de routage retenus	53
3.3.1 DC (<i>Direct Communication</i>)	53
3.3.2 MTE (<i>Minimum Transmission Energy</i>).....	54
3.3.3 LEACH (<i>Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i>)	55
3.3.4 Comparaison de la durée de vie des nœuds avec MTE, DC et LEACH	58
3.4 Environnement de simulation.....	59
3.4.1 OMNet ++	60
3.4.2 Plate forme de simulation construite	63
3.5 Simulation et évaluation des performances	66
3.5.1 Scénario de simulation	66
3.5.2 Critères de performance	67

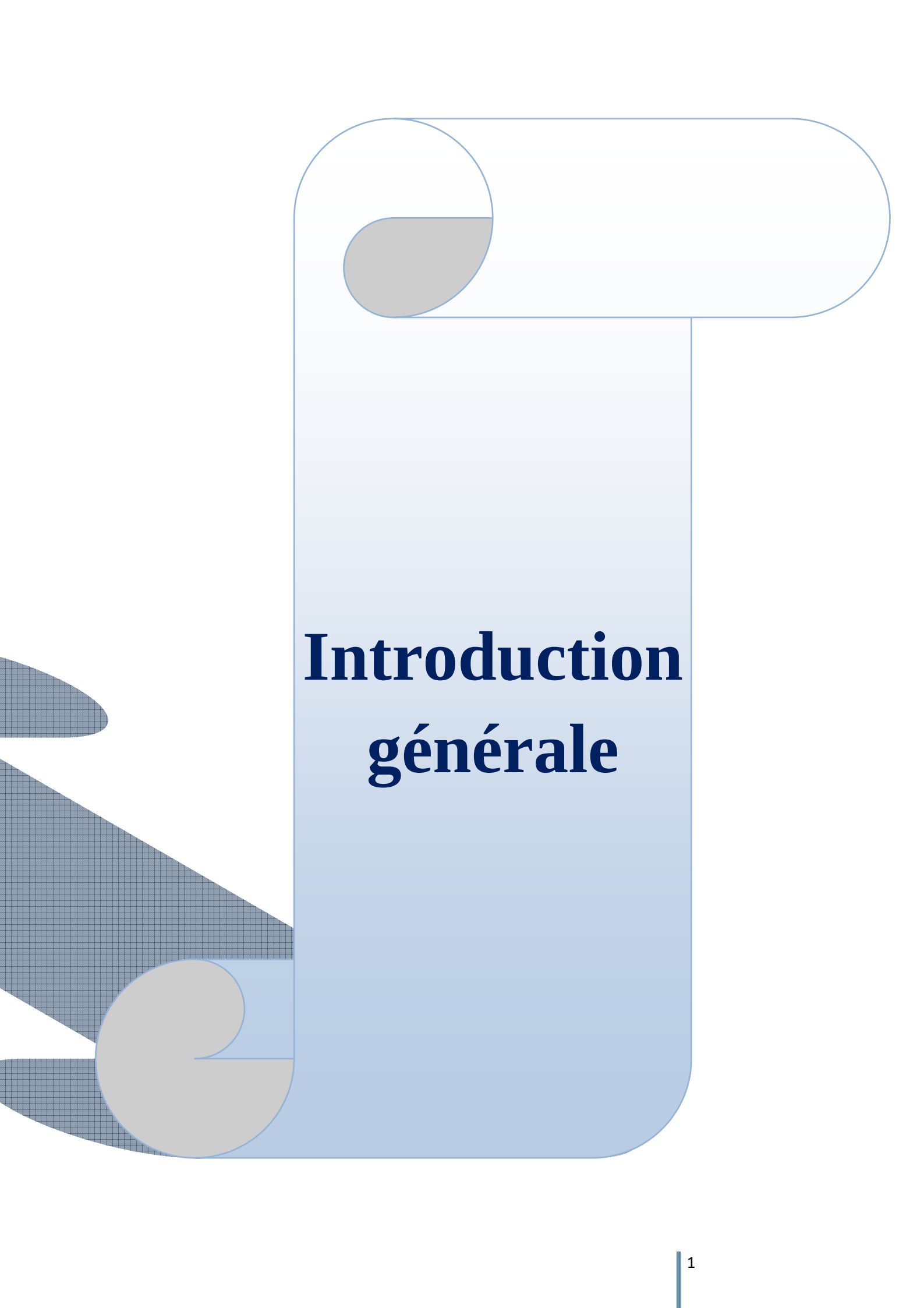
3.5.3 Discussion des résultats.....	68
3.6 Conclusion.....	72
Conclusion générale	74
Liste des Acronymes	77
Références	79

Liste des figures

Figure 1.1 : Exemples de nœuds capteurs.....	6
Figure 1.2 : Architecture d'un nœud capteur.....	7
Figure 1.3 : Exemples de réseaux de capteurs.....	11
Figure 1.4 : Couverture d'un nœud capteur.....	14
Figure 1.5: exemples de domaines d'applications des réseaux de capteurs.....	15
Figure 1.6: Pile protocolaire dans un WSN.....	18
Figure 2.1: Consommation d'énergie dans les WSNs.....	29
Figure 2.2: les techniques de conservation d'énergie.....	33
Figure 2.3: classification des protocoles de routages pour les RCSF.....	37
Figure 2.4: fonctionnement du protocole SPIN.....	42
Figure 2.5: Propagation des intérêts et établissement des gradients.....	43
Figure 2.6: Renforcement des chemins.....	44
Figure 2.7: Agents d'événements.....	47
Figure 3.1: Direct Communication.....	53
Figure 3.2: Minimum Transmission Energy.....	54
Figure 3.3: Le clustering dans les réseaux de capteurs.....	56
Figure 3.4 : Exemple d'un module simple.....	61
Figure 3.5 : Exemple d'un module composé.....	62
Figure 3.6 : architecture en module d'OMNET++.....	62
Figure 3.7: Architecture de la plate forme de simulation.....	63
Figure 3.8 : Message DATA.....	64
Figure 3.9 : Fichier omnetpp100.ini.....	64
Figure 3.10: Les différents composants du nœud.....	65
Figure 3.11: composants du module Communication.....	65
Figure 3.12 : le fichier résultat.....	69
Figure 3.13: Moyenne d'anergie consommée.....	69
Figure 3.14: Durée de vie du réseau pour 100 nœuds.....	71
Figure 3.15: Durée de vie du réseau pour 200 nœuds.....	71
Figure 3.16: Durée de vie du réseau pour 300 nœuds.....	72

Liste des tableaux

Table 1.1: Comparaison entre réseaux de capteurs et réseaux ad-hoc.....	12
Table 1.2: comparaison entre les trois technologies IEEE 802.11, Bluetooth et Zigbee.....	22
Table 2.1: Classification des principaux protocoles de routage pour les WSNs.....	50
Table 3.1: Paramètres de simulation.....	67



Introduction générale

Les progrès réalisés dans le domaine des réseaux sans fil ont contribué à l'évolution de l'Internet en facilitant l'accès aux usagers indépendamment de leur position géographique. L'évolution dans le domaine des communications sans fil et l'informatique mobile gagne de plus en plus de popularité, et les composants mobiles deviennent de plus en plus fréquents. Comme beaucoup de développements technologiques, les réseaux de capteurs sans fil ont émergé pour des besoins militaires tels que la surveillance sur le terrain de combat. Puis, ils ont trouvé leur chemin pour des applications civiles.

Aujourd'hui Les réseaux de capteurs présentent un champ d'application très vaste, citant par exemple : le domaine scientifique, logistique, militaire, domotique, environnementale ou encore de la santé. Selon MIT's Technology Review, il s'agit de l'une des dix nouvelles technologies qui bouleverseront le monde et notre manière de vivre et de travailler.

La batterie est un composant important d'un capteur. En général, elle n'est ni remplaçable ni rechargeable. Elle peut être, en partie, alimentée par une unité génératrice d'énergie comme les cellules solaires de petite taille. Elle fournit donc une quantité d'énergie très limitée à l'échelle de 1 à 2J par nœud (capteur). Elle limite ainsi la durée de vie du capteur et influe sur le fonctionnement global du réseau. C'est pourquoi, les protocoles permettant d'économiser l'énergie occupent, aujourd'hui, un axe important de recherche dans ce domaine.

Un capteur assure l'acquisition, le traitement de données et leurs communications. C'est cette dernière tâche qui est la plus consommatrice d'énergie. Un bon schéma de gestion d'énergie doit donc, en priorité, prendre en compte les communications. La plupart des protocoles de communications dans les réseaux Ad Hoc ne s'adaptent pas aux particularités des réseaux de capteurs. D'où, la nécessité de les améliorer ou de développer de nouveaux protocoles. Les deux principales classes de protocoles utilisées, à l'heure actuelle, dans les réseaux de capteurs sans fils, s'appuient sur la technique de routage multi sauts ou le clustering (voir une hybridation des deux).

Plusieurs approches sont proposées pour calculer le chemin optimal dans les protocoles de routage multi sauts. Certaines proposent de prendre le chemin le plus court, en termes de distance, vers la station de base. D'autres, se basent sur le niveau d'énergie dans les nœuds tout au long du chemin en privilégiant les nœuds ayant des quantités d'énergie résiduelle maximales. D'autres encore, choisissent un chemin optimal en privilégiant certains nœuds dont la présence dans le chemin permet de consommer moins d'énergie. Cependant, le premier inconvénient du routage multi sauts dans les réseaux de capteurs sans fils est la

périodicité des messages envoyés pour maintenir les itinéraires valides, ce qui a pour effet d'encombrer le réseau et de consommer ainsi de l'énergie supplémentaire. Le clustering (ou la classification) donne en revanche de meilleurs résultats, c'est pourquoi nous avons, également, retenu cette approche.

Dans ce mémoire, nous allons nous intéresser aux protocoles de routages à économie d'énergie, et plus exactement aux protocoles DC (*Direct Communication*), MTE (*Minimum Transmission Energy*), et LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), nous allons les étudier, les comparer pour arriver à des conclusions et à des solutions pour router les données tout en économisant l'énergie dans les réseaux de capteur sans fils.

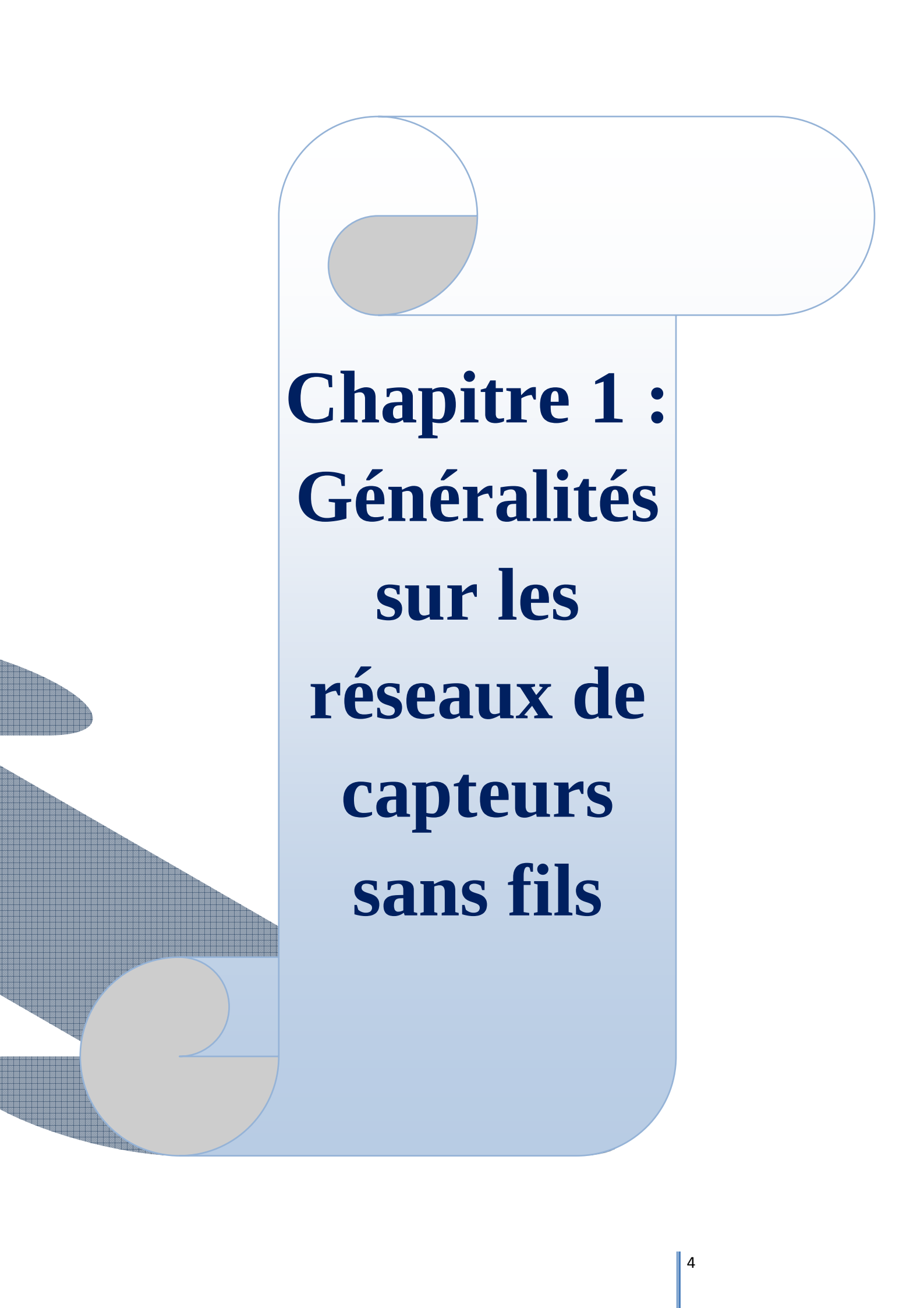
Ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous définissons les réseaux de capteurs sans fil, leur architecture, leurs caractéristiques et leurs domaines d'applications, Nous spécifions par la suite le type de communication utilisé dans ces réseaux, pour discuter à la fin des contraintes liées à ce type de réseau, ainsi que les axes de travaux de recherches.

Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrons sur la contrainte énergétique, nous présentons les différentes opérations qui consomment l'énergie, et les techniques de minimisation de cette consommation. Dans la deuxième partie, nous présenterons les facteurs et les métriques à utiliser pour le développement des protocoles de routages pour les réseaux de capteurs sans fil. Nous enchaînons ensuite avec les protocoles de routage les plus connus dans les réseaux de capteurs sans fil et leur classification.

Dans le troisième chapitre, nous étudions, les trois protocoles DC (*Direct Communication*), MTE (*Minimum Transmission Energy*), et LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) que nous allons comparer, pour en tirer des conclusions quant à leur efficacité sur la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. Par la suite nous présentons l'outil de simulation utilisé qui est OMNeT++, ainsi que la plateforme de simulation construite. Et nous montrons à travers une série de simulations réalisées, quelques résultats et conclusions sur les trois protocoles que nous avons étudiés.

Nous terminons enfin avec une conclusion et quelques perspectives d'avenir.



Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fils

1.1 Introduction

Le besoin d'observer, de capturer, et éventuellement de contrôler des phénomènes physiques tels que la température, la pression, le son, l'humidité, le degré d'irradiation ou encore la luminosité est essentiel pour de nombreuses applications industrielles, scientifiques, et même grand public.

Cette tâche est déléguée aux capteurs dont la fonction principale est l'acquisition de l'information sur les phénomènes observés, voir même l'exécution des traitements qui s'y attachent. L'utilisation des capteurs n'est pas une nouveauté en soi. En effet, de nombreux domaines en font usages, principalement dans l'aéronautique, l'industrie pétrolière, l'automobile, etc. Ce qui est nouveau, c'est leur miniaturisation grandissante et leur perfectionnement constant ainsi que l'abandon des câblages encombrants traditionnellement utilisés au profit des communications radio, à des coûts raisonnables.

En effet, grâce aux récents progrès des technologies sans fil, les capteurs peuvent communiquer non seulement de proche en proche mais aussi d'acheminer de l'information à tous les nœuds connectés au réseau. On s'est ainsi affranchi de la contrainte de câblage, qui limitait considérablement le déploiement d'un grand nombre de nœuds. Il est donc devenu tout à fait possible de déployer un réseau constitué d'un grand nombre de capteurs collaboratifs afin de surveiller une zone plus large.

Dans ce chapitre seront présentées des définitions sur les réseaux de capteurs, ainsi que leurs domaines d'applications, leurs architectures, les différentes contraintes et facteurs influant sur leurs conceptions.

1.2 Capteur

L'utilisation des capteurs sans fil est de plus en plus demandée dans la vie courante. Les industries proposent des capteurs sans fil performants qui peuvent renseigner l'utilisateur sur plusieurs données selon le domaine d'application. Ces capteurs ont une architecture et des caractéristiques qui seront détaillées dans ci-dessous.

1.2.1 Définition d'un capteur

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.) la traduire en une grandeur électronique (tension, résistance, vitesse, etc.) et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Les progrès conjoints de la microélectronique, des technologies de transmission sans fil et des applications logicielles ont permis de produire à coût raisonnable

des micro-capteurs de quelques millimètres cubes de volume, susceptibles de fonctionner en réseaux [1].

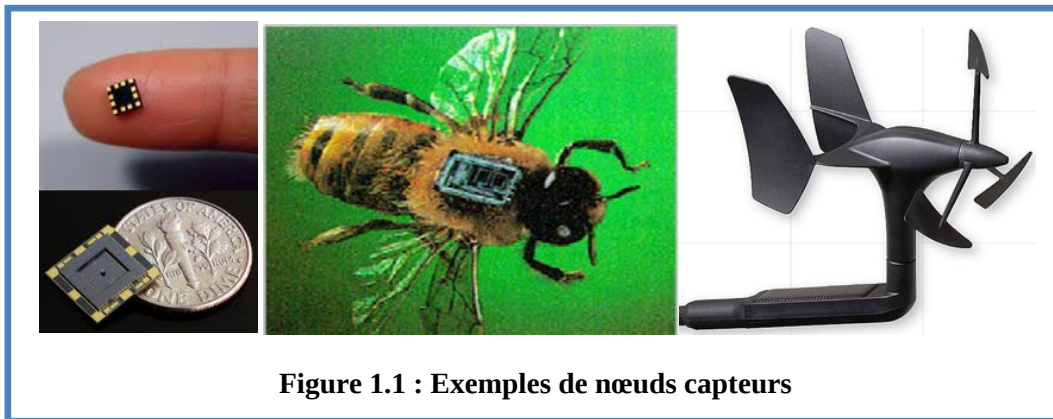


Figure 1.1 : Exemples de nœuds capteurs

Ces dernières années, le marché mondial a connu un intérêt primordial aux systèmes embarqués et technologies de miniaturisation ce qui a permis l'apparition d'un nouveau type de capteurs, nommés capteurs intelligents (smart sensors) qui peuvent être définis selon deux points de vue :

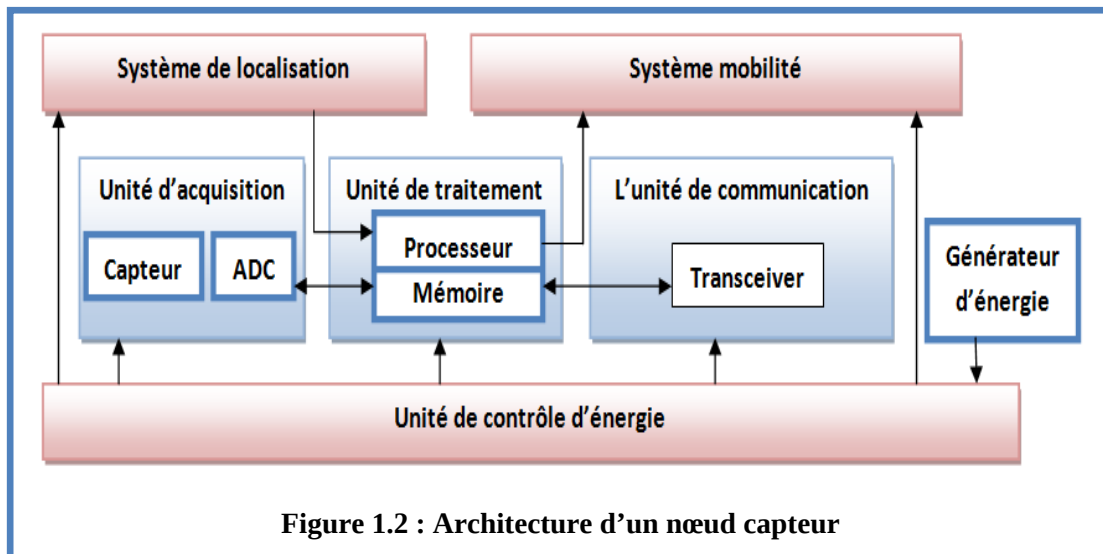
- ✚ Fonctionnel: ce sont des organes capables de détecter, mesurer, convertir et traiter les données collectées en vue de les communiquer à d'autres dispositifs du système.
- ✚ Technologique: correspond principalement à de véritables systèmes miniaturisés qui intègrent dans un volume parfois extrêmement réduit dans le corps du capteur, un organe de calcul interne (microprocesseur, microcontrôleur), un système de conditionnement du signal (programmable ou contrôlé) et une interface de communication avec l'extérieur [3, 4].

Deux types de nœuds capteurs peuvent être distingués : capteurs (nœuds ordinaires) et nœuds puits. Un nœud capteur détecte les phénomènes physiques et surveille son environnement pour transmettre les données nécessaires au nœud puits. Ce dernier les collecte, les stocke et les analyse pour communiquer les résultats à d'autres réseaux auquel il est relié par Internet ou Satellite [1].

1.2.2 Architecture physique d'un capteur

Un nœud capteur est composé de quatre unités de base ou sous-systèmes principaux (voir la figure 1.2). Il s'agit de, l'unité d'acquisition, l'unité de traitement, l'unité de communication et l'unité de contrôle d'énergie [6, 9]. Il peut contenir également, un ensemble supplémentaire de modules selon le domaine d'application, comme le système mobilité

chargé de déplacer le capteur en cas de nécessité, un générateur d'énergie (cellule solaire) ainsi qu'un système de localisation GPS, (*Global Positioning System*).



Unité d'acquisition

Elle est généralement composée de deux sous-unités qui sont les capteurs et les convertisseurs analogiques numériques ADCs (*Analog Digital Converter*). Les capteurs obtiennent des mesures sur les paramètres environnementaux et les transforment en signaux analogiques. Les ADCs convertissent ces signaux analogiques en signaux numériques compréhensible par l'unité de traitement pour pouvoir les analyses.

Unité de traitement

Elle est composée de deux interfaces qui sont une interface avec l'unité d'acquisition et une autre avec l'unité de communication. Et s'occupe du contrôle des capteurs et de la gestion des procédures et protocoles de communication [8, 10]. De plus le microcontrôleur ou le microprocesseur embarqué est associé généralement à une unité de stockage nécessaire à l'implantation et à l'exécution d'un programme (logiciel) qui peut être un système d'exploitation spécialement conçu pour les capteurs.

Ce microprocesseur peut fonctionner selon des modes différents [11] en fonction de la consommation souhaitée ou de la quantité d'énergie restante dans la batterie. Mais faire la navette entre les divers modes de fonctionnement induira à une consommation supplémentaire d'énergie et diminuera donc la durée de vie du capteur.

Unité de communication

Elle est composée d'un émetteur/récepteur responsable d'effectuer toutes les émissions et réceptions de données sur un médium sans fil afin de permettre l'échange d'informations entre le nœud capteur et son environnement extérieur. Dépendamment du domaine d'application, trois médiums de communication sans fil peuvent être utilisés: optique (LASER), infrarouge et radiofréquences (RF : *radio frequency*) [12]. Le laser et l'infrarouge n'utilisent aucune antenne mais leurs capacités de diffusion sont limitées, contrairement à la RF qui nécessite une antenne et possède une portée radio en fonction de l'énergie consommée. Elle reste le moyen le plus répandu pour la communication des capteurs.

Unité de contrôle d'énergie

Elle alimente les unités que nous avons citées et elle n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les réseaux de capteurs. Par ailleurs, les unités d'énergie rechargeables: supportées par des photopiles (cellules solaire) [1] permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique et d'étendre la durée de vie de la batterie.

1.2.3 Système d'exploitation d'un capteur

Le système d'exploitation est un ensemble de programmes responsables d'assurer l'exploitation des ressources matérielles d'un dispositif par les applications utilisateur. Les systèmes d'exploitation destinés aux réseaux de capteurs sont particulièrement réduits, vu l'espace physiquement limité, mais ils doivent présenter plus de performances en termes d'efficacité, temps d'exécution, occupation de la mémoire et surtout gestion d'énergie. Le plus répandu des systèmes d'exploitation pour les réseaux de capteurs est TinyOS.

Tiny OS

TinyOS est un système d'exploitation open-source conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Il a été développé à l'Université de Berkeley pour des applications qui fonctionnaient sur des dispositifs tels que les grains (motes) de Berkeley. Actuellement, il est utilisé par plus de 500 universités et centres de recherche dans le monde [14].

TinyOS respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant la taille du code nécessaire à sa mise en place (quelques kilo-octets). Cela s'inscrit avec l'utilisation du langage de programmation NesC (syntaxiquement proche du C). Sa bibliothèque de composants est particulièrement complète puisqu'elle inclut des protocoles réseaux, des pilotes

de capteurs et des outils d'acquisition de données. Ces composants peuvent être utilisés tel qu'ils sont, comme ils peuvent être aussi adaptés à des applications précises. En s'appuyant sur un fonctionnement événementiel, TinyOS propose une gestion très précise de la consommation d'énergie du capteur et permet une meilleure adaptation à la communication sans fil.

1.2.4 Caractéristique d'un capteur

Actuellement, les capteurs sont considérés comme des éléments incontournables pour mesurer les paramètres physiques dans des environnements variés en vue de remplir une application spécifique. De ce fait, le choix de capteur sera fortement conditionné par les contraintes de l'application et le type d'environnement. Différentes caractéristiques peuvent être tirées [3] dont les plus importantes sont :

Précision

La précision d'un capteur s'exprime en fonction de la grandeur physique mesurée. Elle est généralement présentée comme étant la plus grande erreur prévue entre le réel perçu et les signaux électriques obtenus en sortie du capteur.

Sensibilité

Elle est définie par le rapport entre le signal physique en entrée et le signal électrique de sortie. Caractérise ainsi l'aptitude du capteur à détecter la plus petite variation de la grandeur à mesurer. A titre d'exemple, une sensibilité élevée d'un capteur thermique se produira lors qu'un petit changement de température correspond à un grand changement de tension.

Etendue de mesure et bande passante

L'étendue de mesure n'est qu'une caractéristique qui donne la plage de fonctionnement du capteur pour la grandeur à mesurer. Tandis que la bande passante, exprime la différence des fréquences extrêmes de fonctionnement.

Rapidité

C'est le temps de réaction d'un capteur entre la variation de la grandeur physique qu'il mesure et l'instant où l'information sera prise en compte par la partie commande.

Fidélité

Pour une série de mesures de la même valeur de la grandeur d'entrée, le signal délivré par un capteur ne varie pas.

Bruit

Tous les capteurs produisent un certain bruit de rendement, en plus du signal de sortie. Dans beaucoup de cas, le bruit généré limite les performances d'exécution du système embarqué sur le capteur.

1.3 Réseaux de capteurs

Contrairement aux réseaux filaires traditionnels, les réseaux de capteurs sans fil offrent une grande flexibilité en se débarrassant des problèmes liés aux câblages et la mobilité des nœuds. Dans ce qui suit, nous étudierons ce nouveau type de réseaux sans fil, son architecture, les différences qui le distingue des réseaux ad hoc ainsi que ses principales caractéristiques.

1.3.1 Définition d'un réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil WSN (*Wireless Sensor Networks*) sont considérés comme un type spécial de réseaux ad hoc. Cela sous entend que ces réseaux sont dépourvus d'infrastructure préexistante et d'administration centralisée, où chaque nœud peut communiquer via des interfaces sans fil (généralement en utilisant le support radio).

Les nœuds d'un réseau sont déployé en masse des centaines voir des milliers de capteurs, qui sont matériellement petits, construits à partir des composants pas chers pour maintenir un coût raisonnable pour le réseau, et placés généralement près des phénomènes auxquels ils s'intéressent dans les leur environnements de déploiement. Ces capteurs sont capables de récolter, traiter et d'acheminer les données environnementales de la région surveillée d'une manière autonome, vers une ou plusieurs station de collecte appelées nœuds puits ou stations de base [16, 17].

En effet, ces réseaux se trouvent à la rencontre d'une variété de domaines de recherche : systèmes distribués, réseaux mobiles ad hoc, robotiques et systèmes de sécurité. Leur capacité de communication et souplesse de déploiement par simple dissémination aléatoire des nœuds capteurs (par exemple : largage depuis un avion ou un bateau) dans la zone de surveillance, a conduit à leur utilisation dans des secteurs différents en permettant ainsi leur intégration dans des environnements hostiles où l'intervention humaine après déploiement est difficile et parfois impossible. Comme par exemple : les incendies de forêts, un site après tremblement de terre, champs de surveillances des ennemies et dans des régions glaciaires ou tropicales dans le but est de suivre de manière précise les effets du réchauffement de la planète, les changements climatiques et l'augmentation de la pollution [18, 19].



1.3.2 Architecture d'un réseau de capteurs

Les nœuds capteurs décrits précédemment, sont très souvent dispersés dans une zone géographique appelée champ de captage, qui définit la zone d'intérêt pour le phénomène observé. Les données sentées sont acheminées par un routage multi saut au point de collecte. La station de base ou le nœud puits, peut être fixe ou mobile.

Ainsi, l'utilisateur peut surveiller et commander l'environnement à distance via Internet ou un satellite, en adressant des requêtes précisant le type de données à récolter aux autres nœuds du réseau via le nœud puits [20].

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

1.3.3 Réseaux des capteurs vs des réseaux MANETs

Comme les réseaux de capteurs sans fil sont apparentés aux réseaux ad hoc, ces deux types de réseaux ont de nombreux points communs comme l'absence d'infrastructure, l'autonomie et l'utilisation des ondes radio pour la communication [21]. Mais les contraintes et les besoins de ces réseaux diffèrent, le tableau ci-dessous montre ces différences.

	Réseau de capteurs	Réseau ad-hoc
Composition	Petits micro-capteur	Portables, PDA
Flot de communication	Plusieurs à un (many to one)	Plusieurs à plusieurs (many to many)
Communication	Diffusion	Point à point
Mobilité	Mobilité faible	En constante évolution et mobilité forte
Relation entre les nœuds	Collaboration pour le même objectif	Chaque nœud à son propre objectif
Identification des nœuds	Très grand nombre de nœud n'ayant pas tous une ID	Présence de la notion d'ID
Objectif du réseau	Objectif ciblé	Générique /communication
Contrainte clé	Ressource énergétiques	Débit / QOS
Nombre de nœuds	Grand (de l'ordre de mille)	Moyen (de l'ordre de cent)
Les pannes	Plus susceptible aux pannes	Moins susceptible aux pannes
Capacité de traitement et de stockage	Moindre	Plus importante
Agrégation des données	Les nœuds agrègent les données	Pas d'agrégation

Table 1.1: Comparaison entre réseaux de capteurs et réseaux ad-hoc

1.3.4 Caractéristique d'un réseau de capteurs

Dans les paragraphes suivant on va détailler les caractéristiques spécifiques aux réseaux de capteurs sans fil.

Contrainte d'énergie

Dans les réseaux ad hoc, la consommation d'énergie a été considérée comme un facteur déterminant mais pas primordial car les ressources énergétiques peuvent être remplacées par l'utilisateur. Ces réseaux se focalisent plus sur la QoS que sur la minimisation de la consommation d'énergie. Par contre, dans les réseaux de capteurs, la consommation d'énergie est une contrainte très importante puisque généralement les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile voire impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau en entier [22].

Forte densité

Les réseaux de capteurs sont caractérisés par une grande densité des nœuds déployés dans la région à surveiller. Un réseau peut contenir des centaines voir des milliers de nœuds capteurs.

Ressources limitées

Les capteurs sont des objets communicants à taille très réduite ce qui limite leurs ressources en termes de : mémoire disponible, puissance de traitement, bande passante et particulièrement en quantité d'énergie embarquée.

Déploiement des nœuds

Il existe, en effet, plusieurs stratégies pour déployer les nœuds d'un réseau de capteurs sur une zone à surveiller, le choix d'une de ces stratégies dépend du type de l'application et de l'objectif du réseau. Le déploiement peut être déterministe ou aléatoire [20, 22].

Dans la première stratégie, les capteurs sont placés manuellement et les données sont conduites via des chemins prédéterminés, mais cette solution devient impossible dès que l'on considère un très grand nombre de capteurs. Le déploiement aléatoire consiste à disperser les capteurs sur le champ de captage en masse (ex : lâchés d'un avion). D'autre part, un mélange de ces deux techniques peut être envisagé.

Les caractéristiques de déploiement, le fonctionnement autonome et la fréquence élevée de pannes (due à l'épuisement d'énergie ou la destruction) rendent la maintenance de la topologie d'un réseau de capteurs complexe. En effet, plusieurs centaines de capteurs sont déployés avec une densité pouvant être supérieure à 20 nœuds par m^3 , ce qui exige une bonne gestion de la maintenance de la topologie du réseau déployé. De plus, il est toujours préférable de prévoir une forte densité autour de la station de base car toutes les données sont acheminées vers cette station.

Mobilité

La mobilité devient une question clé pour certains types de réseaux de capteurs. Par exemple, dans des applications de détection où les capteurs sont embarqués sur des dispositifs mobiles tels que les véhicules, ou sur des animaux. Si la mobilité est trop fréquente, elle ne peut être considérée comme un problème secondaire dans ce type d'environnement.

Ainsi, la détection des voisins et la reconfiguration du réseau exigent habituellement un nombre important de messages de contrôle de topologie, ce qui induit à une dépense importante en énergie. En outre, un autre type de mobilité pourrait être pris en compte, qui est

la mobilité de la station de base et dans d'autres cas la mobilité des deux dispositifs en même temps : nœuds et station de base [22].

Auto organisation du réseau et évolutivité de la topologie

Ceci peut être nécessaire, vu la grande densité des nœuds capteurs et leur déploiement dans des zones d'intérêt critiques où aucune intervention humaine ne peut être possible pour assurer leur organisation. Et donc, les nœuds peuvent échouer (par manque d'énergie où destruction physique), comme de nouveaux nœuds peuvent rejoindre le réseau. Par conséquent, le réseau doit être capable de s'auto organiser et de se modifier périodiquement de sorte qu'il puisse s'adapter aux changements de la topologie tout en assurant son fonctionnement [22].

Couverture limitée

Dans les réseaux de capteurs, chaque nœud obtient une certaine vue locale de l'environnement qui est limitée par sa portée. La couverture d'une vaste surface est composée de l'union de nombreuses couvertures de petite taille assurée par ces nœuds.

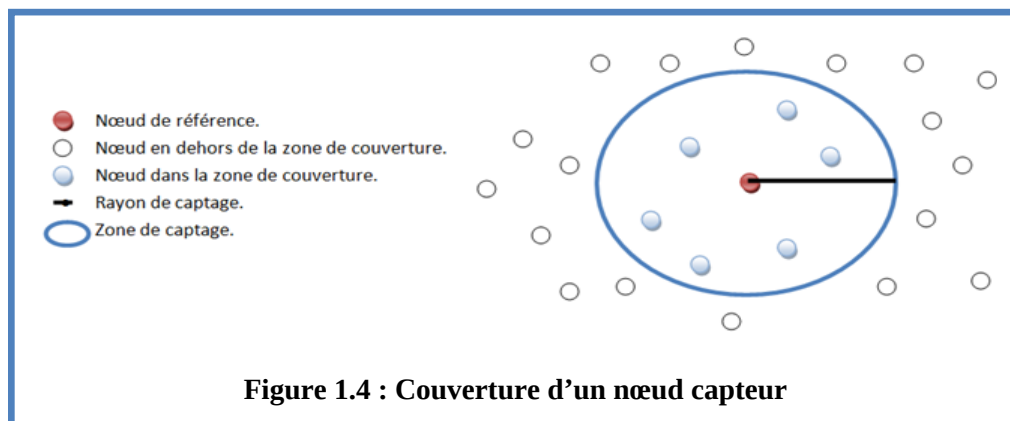


Figure 1.4 : Couverture d'un nœud capteur

Connectivité

La densité très élevée des nœuds dans les réseaux de capteurs exclue complètement leur isolement et augmente ainsi leur connectivité. Un réseau de capteurs est dit connecté si et seulement si, il existe au moins une route entre chaque paire de nœuds [23]. La connectivité dépend essentiellement de l'existence des routes. Elle est affectée par les changements de la topologie du à la mobilité et la défaillance de ces nœuds.

Sécurité physique limitée

A l'instar des réseaux ad hoc, les réseaux de capteurs sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui minimisent le contrôle sur les données transférées [24].

1.4 Domaines d'application des réseaux de capteurs

La diminution de la taille, du coût et de la consommation d'énergie des micros capteurs, l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations, ...) et l'évolution des supports de communication sans fil ont élargi le champ d'application des réseaux de capteurs. Les RCSF peuvent être utilisés dans plusieurs applications [10, 25, 8, 26]. Parmi elles, nous citons :

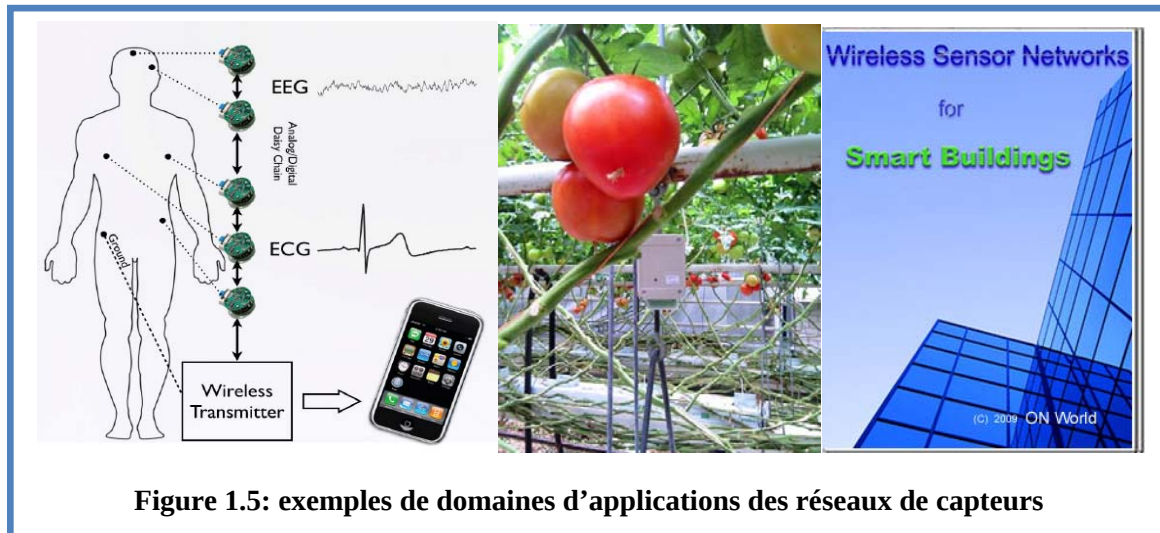


Figure 1.5: exemples de domaines d'applications des réseaux de capteurs

Applications militaires

Comme pour beaucoup d'autres technologies, ce sont historiquement les militaires qui se sont intéressés les premiers aux réseaux de capteurs. Aujourd'hui, ces réseaux sont devenus un axe de recherche très important. Ils peuvent être rapidement déployés pour la détection des produits chimiques, biologiques et armes nucléaires et autres.

Découverte de catastrophes naturelles

On peut créer un réseau autonome en dispersant les nœuds dans la nature. Des capteurs peuvent ainsi signaler des événements tels que les feux de forêts, les tempêtes ou les inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours [27].

Détection d'intrusions

En plaçant à différents points stratégiques des capteurs, on peut ainsi prévenir des cambriolages ou des passages de gibier sur une voie de chemin de fer (par exemple) sans avoir à recourir à de coûteux dispositifs de surveillance vidéo.

Gestion de stock

On pourrait imaginer devoir stocker des denrées nécessitant un certain taux d'humidité et une certaine température. Dans ces applications, le réseau doit pouvoir collecter ces différentes informations et alerter en temps réel si les seuils critiques sont dépassés.

Contrôle de la pollution

Des capteurs au-dessus d'un emplacement industriel offrent la possibilité de détecter et de contrôler des fuites de gaz ou de produits chimiques. Ces applications permettent de donner l'alerte en un temps record et de pouvoir suivre l'évolution de la catastrophe [28].

Agriculture

Des nœuds peuvent être incorporés dans la terre et on peut interroger le réseau sur l'état du champ et déterminer par exemple les secteurs les plus secs afin de les arroser en priorité. On peut aussi imaginer équiper des troupeaux de bétail de capteurs pour connaître en temps réel, leur position ce qui éviterait aux éleveurs d'avoir recours à des chiens berger.

Surveillance médicale

En implantant sous la peau de mini capteurs vidéo, on peut recevoir des images d'une partie du corps en temps réel sans aucune chirurgie. On peut ainsi surveiller la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle [29].

Surveillance de barrages

On peut inclure sur les parois des barrages des capteurs qui permettent de calculer en temps réel la pression exercée. Il est donc possible de réguler le niveau d'eau si les limites sont atteintes. On peut aussi imaginer inclure des capteurs entre les sacs de sables formant une digue de fortune. La détection rapide d'infiltration d'eau peut servir à renforcer le barrage en conséquence. Cette technique peut aussi être utilisée pour d'autres constructions telles que les ponts, voies de chemins de fer, routes de montagnes, bâtiments et autres.

Domotique

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs..., donnant ainsi naissance à un autre type d'application dans lequel les réseaux de capteurs émergent [30]. Dans ces applications, le réseau de capteurs est déployé dans l'habitation. Le principe est que le réseau forme un environnement, qui a pour but de fournir toutes les informations nécessaires aux applications de confort, de sécurité et de maintenance dans l'habitat. Les

capteurs sont des capteurs de présence, de son, ils peuvent même être équipés de caméras. Un tel réseau doit permettre de créer une maison intelligente capable de comprendre des situations suivant le comportement des occupants et d'en déduire des actions.

Ces réseaux sont donc très hétérogènes (des éléments d'électroménager peuvent faire partie du réseau aussi bien que les ordinateurs personnels). Il se peut que certains éléments aient besoins d'être économes en énergie mais ce n'est pas le cas de tout le réseau (il ne s'agit pas d'applications de réseaux grande échelle).

En revanche, ces réseaux doivent être hautement reconfigurables d'une part la topologie du réseau peut changer d'un jour à l'autre avec l'aménagement, d'autre part on peut avoir besoin de changer le type d'application pendant la vie du réseau.

1.5 Communication dans les réseaux de capteurs

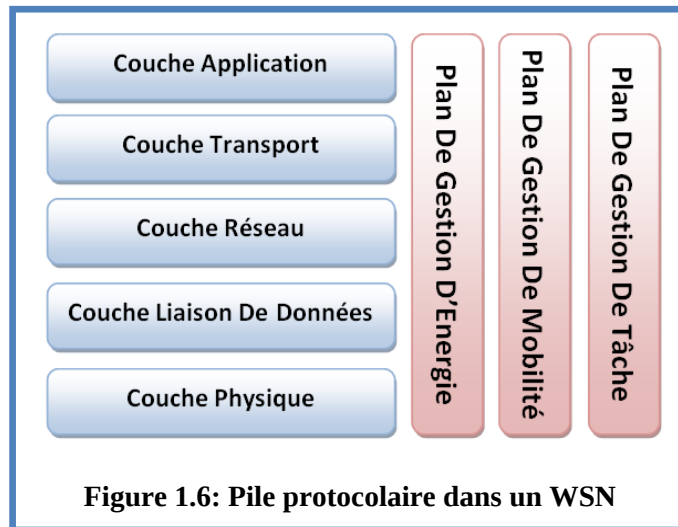
Dans les réseaux de capteurs, les nœuds doivent bien réagir avec l'environnement où ils sont placés. Ainsi, ils doivent permettre une communication multi sauts pour les données qui circulent dans la zone de capture. Pour cela, un modèle de communication est proposé par Ian et al [1] dont le rôle principal est la standardisation de la communication entre les participants afin que différents constructeurs puissent mettre au point des produits (logiciels ou matériels) compatibles. Ce modèle combine l'énergie et le routage, intègre les données avec les protocoles réseaux et promet une communication efficace entre les différents nœuds à travers un medium sans fil.

1.5.1 Pile protocolaire (modèle en couche)

Par analogie au modèle OSI (*Open Système Interconnexion*) des réseaux filaires, le modèle de communication utilisé dans les réseaux de capteurs comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI.

Comme la communication n'est pas le seul souci dans les réseaux de capteurs, il y a d'autres critères très importants qu'il faut prendre en compte. De ce fait, d'autres couches supplémentaires sont ajoutées pour gérer l'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnancement des tâches.

Le rôle et les caractéristiques des couches : application, transport, réseau, liaison de données, physique et les niveaux intégrés : plan de gestion d'énergie, plan de gestion de mobilité et le plan de gestion de tâche sont résumés dans le paragraphe suivant.



Couche application

Suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et implémentées sur cette couche. Elle fournit des mécanismes pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec le réseau en lui fournissant des interfaces pour la création et la diffusion des requêtes et un moyen d'interpréter les réponses reçues [1].

Couche transport

Cette couche constitue une interface entre la couche application et la couche réseau. Elle est responsable : du transport de données, leur découpage en paquets, contrôle de flux, conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

Couche réseau

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont dispersés à forte densité pour observer un phénomène dans une région. Par conséquent, ils sont très proches les uns des autres. Pour assurer la propagation du signal sans effets de dégradation, les réseaux de capteurs utilisent une communication multi sauts. De plus, les nœuds doivent consommer moins d'énergie pour acheminer les données capturées dans le réseau au nœud puits, ce qui rend l'utilisation des protocoles de communication traditionnels des réseaux Ad hoc impraticables. Par ailleurs d'autres caractéristiques peuvent être citées [17] afin d'illustrer le besoin de nouveaux protocoles de routage pour les réseaux de capteurs:

- ✦ Il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global vu le grand nombre de nœuds capteurs.
- ✦ Les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement des données mesurées par de multiples sources à un nœud puits particulier.

- ✦ Les multiples capteurs peuvent produire les mêmes données à proximité d'un phénomène (redondance des données captées due à la forte densité de déploiement).
- ✦ Les capteurs exigent une gestion soigneuse des ressources disponibles à savoir : la puissance de transmission, énergie de la batterie, ainsi que la puissance de traitement et stockage.

Couche liaison de données

La couche liaison [17] est à la charge du multiplexage de données, détection des trames, la gestion de l'accès au support de communication et le contrôle d'erreurs. Elle assure la fiabilité de la communication point à point et multipoint. Cependant, les protocoles MAC (*Media Access Control*) conventionnels ne sont pas directement applicables dans les réseaux de capteurs. Cette couche, exige l'utilisation de protocoles qui doivent être capables de réduire au minimum la collision avec l'émission des voisins et de minimiser les retransmissions.

Couche physique

Dans cette couche les besoins d'une modulation simple et robuste à motiver l'utilisation des techniques de transmission et de réception de données afin d'assurer la sélection des fréquences, la génération des porteuses et le cryptage des différentes données [1]. De manière générale, le choix d'un bon schéma de modulation est critique et dépend du système utilisé.

Trois couches supplémentaires sont intégrées dans la pile protocolaire décrite ci-dessus :

Gestion d'énergie

Cette partie gère la manière dont les nœuds utilisent leurs énergies. Généralement un capteur ne nécessite qu'une source énergétique limitée. Comme la vie du nœud a une dépendance forte à l'égard de la vie de la batterie, il doit par conséquent contrôler et minimiser sa consommation d'énergie. Par exemple, après la réception d'un message, le capteur éteint son récepteur et se met en mode sommeil afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie atteint un seuil bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte pour les informer qu'il ne peut pas participer au routage. L'énergie restante est réservée à la capture [1].

Gestion de mobilité

Il permet la détection et l'enregistrement des mouvements des nœuds capteurs afin de maintenir des informations sur leurs localisations et d'entretenir continuellement une route vers l'utilisateur final. Dans plusieurs cas les nœuds capteurs peuvent être mobiles suite à une

configuration d'une nouvelle topologie ou bien par un changement d'emplacement désiré par l'utilisateur. Le système de gestion de mobilité doit être capable de commander les nœuds pour réaliser les mouvements nécessaires [1].

Plan de gestion de tâche

Ordonnance et balance les différentes tâches de capture de données dans une région spécifique. Il n'est pas nécessaire que tous les nœuds de cette région effectuent la tâche de capture en même temps, certains nœuds exécutent cette tâche plus que d'autres selon leur niveau de batterie [1]

1.5.2 Technologie et standard de communication

Pour assurer la communication sans fil entre les nœuds d'un réseau de capteur, un certain nombre de supports de communication peuvent être employés. Par exemple: la radio, la lumière diffusée, le laser...etc.

Parmi les standards les plus aptes à être exploités dans les réseaux de capteurs on retrouve :

WIFI (IEEE 802.11)

Ce standard [7] soutenu par l'alliance WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), est très connu actuellement, son nom vient de l'expression anglaise "*Wireless Fidelity*". Un certain nombre de normes dérivées ont été créées. La technologie WiFi (802.11 et ses variantes), bien qu'elle soit conçue pour les LANs sans fil qui se composent habituellement d'ordinateurs portables, de téléphone, et de PDAs, est également supposée utilisable aux réseaux de capteurs.

Cependant, la consommation d'énergie élevée et le débit excessif rendent les protocoles 802.11 non appropriés aux réseaux de capteurs. Ce fait a motivé les chercheurs à concevoir des protocoles MAC efficaces en énergie et spécifiques aux réseaux de capteurs.

Bluetooth (IEEE 802.15.1 et .2)

La technologie Bluetooth, dont Ericsson a initié le projet en 1994 a pour but principal de remplacer les câbles sur de petites distances. Elle est utilisée dans les téléphones portables comme interface de connexion pour accéder à un PC. Malheureusement, le grand défaut de cette technologie est sa trop grande consommation d'énergie. Elle ne peut donc pas être utilisée par des capteurs qui sont alimentés par une batterie et qui, idéalement, devraient fonctionner durant plusieurs années [13]. En voici quelques caractéristiques de la technologie Bluetooth tirées de [31] :

- ✦ Bluetooth est une technologie sans fil, déposé comme standard à l'IEEE, c'est la 802.15.
- ✦ Elle fonctionne dans le spectre de fréquences 2,4 GHz.
- ✦ Bluetooth est destiné à un usage personnel et se classe dans la catégorie PAN (*Personal Area Network*), réseau à zones restreintes de quelques dizaines de mètres.
- ✦ La technologie sans fil Bluetooth est orientée vers les applications données et voix.
- ✦ Elle peut fonctionner sur une distance de 10 ou de 100 mètres selon la classe de l'appareil Bluetooth. Le débit de données maximal s'élève à 3 Mbits/s.
- ✦ Les ondes de la technologie sans fil Bluetooth peuvent traverser des objets massifs.
- ✦ Cette technologie est omnidirectionnelle et ne nécessite pas la visibilité directe des appareils connectés.

Lors du développement de la spécification Bluetooth, la sécurité a toujours été et continue d'être une priorité.

Zigbee (IEEE 802.15.4)

La technologie Zigbee, gérée par la Zigbee alliance et combiné avec IEEE 802.15.4, offre des caractéristiques qui répondent mieux aux besoins des réseaux de capteurs. Cette technologie qui est destinée aux environnements à faible consommation d'énergie et équipements électroniques portables permet un transfert stable de données, une installation facile, un coût réduit ainsi qu'une très basse consommation d'énergie nettement moins que Bluetooth [13, 32]. Ces performances en termes de consommation d'énergie ont poussé plusieurs industriels de capteurs à l'intégrer dans leurs produits capteurs comme MicaZ, Telos, ...etc. Zigbee fonctionne globalement sur la bande de fréquences des 2,4 GHz mais également à 916 MHz en Amérique du nord et à 866 MHz bande libre en Europe.

Ses principales caractéristiques sont :

- ✦ Débits compris entre 20 et 250 Kbits/s.
- ✦ Supporte différentes types de topologies réseau (étoile, mesh).
- ✦ Signal robuste et résistant aux interférences.
- ✦ Pénétration à travers les murs et plafonds.
- ✦ Sécurité: exige un contrôle d'accès, cryptage de données.
- ✦ Permet de connecter jusqu'à 255 matériels par réseau sur une portée allant jusqu'à 100 mètres.
- ✦ Cycles d'émissions/réceptions et connexions au réseau très rapides ce qui permet une faible consommation d'énergie.

Ci-dessous un tableau comparatif entre les trois technologies de communications décrites précédemment.

Technologie	WIFI	Zigbee	Bluetooth
IEEE	802.11 a/b/g	802.15.4	802.15.1
Besoins en mémoire	1 Mb +	4-32 Kb	250 Kb+
Autonomie de la pile	Heures	Années	Jours
Vitesse de transfert	11-54 et + Mb/s	250 KB/s	1Mb/s
portée	300 m	100 m	10-100 m

Table 1.2: comparaison entre les trois technologies IEEE 802.11, Bluetooth et Zigbee

1.6 Contraintes liées aux réseaux de capteurs

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit [1]:

Tolérance aux fautes

Certains nœuds peuvent être défaillants ou inhibés à cause d'un épuisement d'énergie, ou subissent des dommages physiques (écrasés par des animaux ou lorsqu'ils sont jetés par un avion). La défaillance de ces capteurs ne doit pas affecter la globalité de la tâche du réseau. La tolérance aux pannes est la capacité de soutenir les fonctionnalités d'un réseau de capteurs sans causer des interruptions lorsqu'un capteur cesse de fonctionner (la panne ne devrait pas avoir une influence sur le fonctionnement du réseau) [33, 34]. De ce fait, des protocoles et des techniques peuvent être conçus pour évaluer le niveau de la tolérance aux pannes exigé dans les réseaux de capteurs. Si les capteurs sont déployés dans un habitat, la tolérance aux pannes exigée peut être basse, puisque ce type de réseaux n'est pas facilement endommagé, alors que si les capteurs sont déployés dans un champ de bataille pour la surveillance et la détection, la tolérance aux pannes devrait être élevée puisque les données surveillées sont critiques et les capteurs peuvent être détruits facilement par des actions hostiles.

Passage d'échelle (Scalability)

Le nombre de nœuds capteurs augmente sur un réseau sans fil et ce nombre peut atteindre le million. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions entre les nœuds et peut imposer des difficultés pour le transfert de données. Le réseau doit donc être capable de fonctionner efficacement avec une grande quantité de capteurs. De plus, les nœuds doivent traiter un grand nombre d'événements sans être saturés [30].

Les coûts de production

Souvent les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel. Dès lors, la minimisation du coût de production du nœud capteur constitue un grand défi mené par les chercheurs, vu les fonctionnalités que doivent comporter ces nœuds et l'objectif désiré pour un coût inférieur à 1 Dollar [35].

Environnement

Les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille au delà des lignes ennemies, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement hostiles [36],... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.

Topologie de réseau

Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : déploiement, post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...) et redéploiement de nœuds additionnels.

La plupart des architectures réseau reposent sur des capteurs statiques. Pourtant, la mobilité des stations de base et/ou des capteurs est parfois nécessaire dans de nombreuses applications. Par exemple le cas des capteurs attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire rendant ainsi, la topologie du réseau fréquemment changeante et en constante évolution. Egalement, l'état d'activité des capteurs (extinction, mise en veille et actif) intervient dans les changements de la topologie. La conception d'un protocole d'auto-organisation qui s'adapte continuellement et rapidement aux changements, s'avère nécessaire pour assurer le bon fonctionnement du réseau [37].

Qualité de service

Dans diverses applications, la donnée doit être transmise dans une certaine plage de temps, sinon elle devient inutile. Pourtant, dans la plupart des applications la durée de vie du réseau est favorisée au détriment de la qualité d'émission des données. Les protocoles de routage assurant une qualité de service et prenant en compte la gestion de l'énergie, représentent un nouveau défi.

Contraintes matérielles

La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont la consommation d'énergie qui doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps

possible, qu'il s'adapte aux différents environnements (fortes chaleurs, eau,...), qu'il soit autonome et très résistant vu qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles [38].

Médias de transmission

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont reliés par une architecture sans fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être standardisé. On utilise le plus souvent l'infrarouge, le Bluetooth [39] et les communications radio Zig Bee, WIFI [40].

Consommation d'énergie

Un capteur, de par sa taille, est limité en énergie. Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (multi sauts) chaque nœuds collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un ré-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation [42].

1.7 Quelque axe de travaux de recherche dans les WSN

Les travaux de recherche menés dans le domaine des réseaux de capteurs ont révélé plusieurs problématiques. Tous les challenges posés dans ces réseaux sont dus principalement à la taille des capteurs. Autrement, on recherche une miniaturisation maximale et des performances optimales quant à la transmission, le débit et la consommation d'énergie qui est un facteur primordial dans ce type de réseaux. Parmi ces problématiques, nous citons [2]:

Routage

Concevoir un protocole de routage performant en termes de minimisation de la consommation de l'énergie, du choix des routes optimales pour l'acheminement de l'information d'un capteur à la station de base et vice versa, de réduction du délai de délivrance des paquets, ainsi qu'au passage du réseau à l'échelle sans que ses performances se dégradent, constitue la plus grande part des travaux réalisés dans le domaine des réseaux de capteurs. La majorité des recherches menées actuellement sur les protocoles de routage se focalisent sur le routage hiérarchique. Le routage hiérarchique consiste à structurer le réseau en un ensemble de groupes nommés clusters selon un processus de clustering. Un cluster est constitué d'un chef

“cluster head” et de ses membres. Chaque nœud membre envoie les données captées à son cluster head.

Pour garantir cela, deux schémas sont utilisés: dans le premier, un nœud membre ne communique qu’avec son “cluster head”. Par contre, le deuxième schéma tolère l’utilisation d’autres nœuds cluster heads comme relais.

Couche MAC

La spécificité des réseaux de capteurs sans fil nécessite le développement de nouveaux protocoles MAC qui s’adaptent aux contraintes imposées par ces réseaux.

Ceci dans le but de minimiser la consommation d’énergie, optimiser le partage du médium ainsi que minimiser le délai de délivrance des paquets.

Qualité de service

Des protocoles au niveau de la couche MAC devraient être capables d’établir des priorités entre les flux, limiter les pertes de paquets pour la gestion du réseau, ou du moins en restreindre l’impact. En outre, dans les réseaux de capteurs orientés événements où l’information devra être remontée au centre de contrôle dans un meilleur délai, il est nécessaire d’optimiser conjointement les critères latence et conservation d’énergie, car la faible latence peut avoir un impact négatif sur le nombre de communications et par la suite sur la consommation d’énergie dans ces réseaux. Pour cela, les protocoles de routage garantissant la qualité de service doivent également respecter la contrainte énergétique. Cet axe de recherche motive d’avantage les chercheurs et attire de plus en plus d’intention.

Cross-layer

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

Diffusion de l’information

Les protocoles de diffusion conçus pour les réseaux de capteurs doivent tenir compte de leurs spécificités ainsi que de leurs contraintes intrinsèques imposées. Et donc, pour la conception d’un protocole efficace pour ce type de réseaux on doit assurer une couverture maximale des

capteurs composant le réseau, minimiser le nombre des réémissions et des réceptions redondantes et modérer la consommation d'énergie.

Sécurité

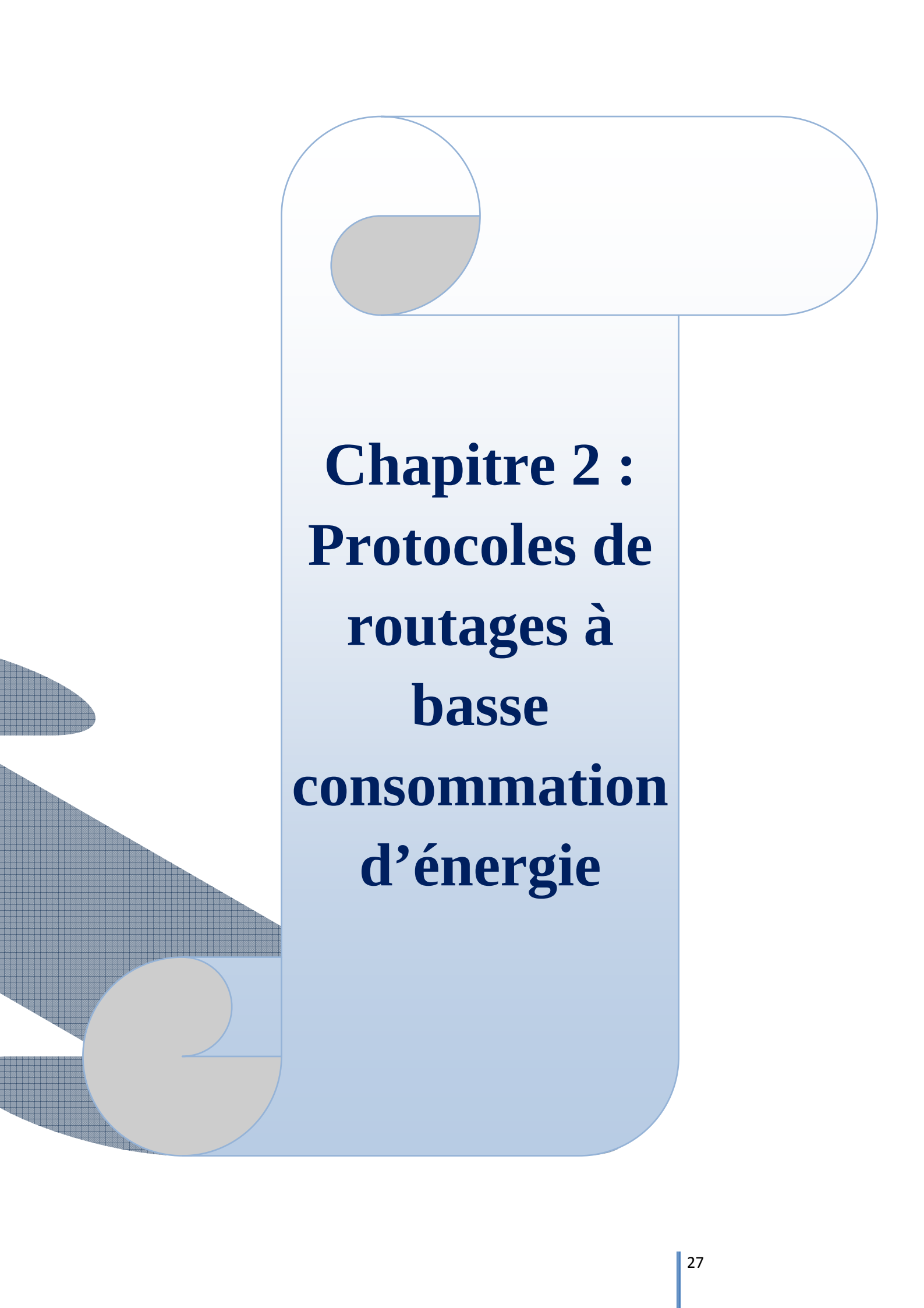
Pour les applications qui exigent un niveau de sécurité assez élevé telles que les applications militaires, des mécanismes d'authentification, de confidentialité et d'intégrité doivent être mis en place au sein de leur communauté. Les algorithmes de cryptographie conçus pour les réseaux de capteurs doivent tenir compte des ressources limitées que présentent ces réseaux.

1.8 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil sont une technologie récente. Mais la baisse des coûts de production des capteurs, l'augmentation de l'autonomie, l'allongement de la durée de vie des batteries, la miniaturisation de plus en plus choquante et l'arrivée de nouveaux domaines d'applications, annoncent un futur prometteur à cette technologie. De plus, le développement de nouveaux capteurs permettra d'étendre les domaines d'applications qui sont déjà large et de faire des réseaux de capteurs une partie intégrante de notre quotidien.

Avec les réseaux de capteurs un pas de plus est franchi dans la direction des réseaux sans fil. Cependant, la réalisation de telles infrastructures dynamiques et reconfigurables, doit satisfaire quelques contraintes, parmi lesquelles on peut citer la consommation d'énergie, le prix du matériel, le changement de topologie et l'adaptation à l'environnement. Ces contraintes exigent que des nouvelles techniques de gestion de réseau sans-fil soient mises au point. Ceci explique pourquoi cette nouvelle technologie est malheureusement encore trop peu répandue sur le terrain.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude détaillée du concept d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil et les techniques utilisées pour sa conservation, et pour présenter des protocoles de routages à contrainte énergétique déployés pour ces réseaux.



Chapitre 2 : Protocoles de routages à basse consommation d'énergie

2.1 Introduction

Le routage est la méthode d'acheminement des données d'une source à la bonne destination à travers un réseau de connexion. Le but du routage est de trouver l'investissement de moindre coût qui assure le routage du trafic et garantit la survie du réseau devant toute panne de lien ou de nœud [51].

Le problème qui se pose dans le contexte des RCSFs est l'adaptation de l'approche de routage utilisée avec le grand nombre de nœuds existants, dans un environnement caractérisé par de modestes capacités de calcul, des réserves d'énergie et de capacité mémoire limitées.

Il semble donc important que toute conception de protocole de routage doit passer par l'étude des problèmes importants tels que la tolérance aux fautes, l'utilisation optimale des ressources des nœuds, le passage d'échelle et l'assurance d'une bonne qualité de service, et bien sur tenir compte de la contrainte énergétique.

2.2 Consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs

La première étape dans la conception d'un capteur sans fil consiste à analyser ses caractéristiques de consommation d'énergie. Cette analyse systématique de l'énergie est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace.

L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes : la capture, le traitement et la communication [43].

2.2.1 Energie de capture

Les sources de consommation d'énergie des nœuds pour les opérations de détection ou de capture sont: l'activation de la sonde de capture, le conditionnement du signal, le traitement de signal, l'échantillonnage, et la conversion analogique-numérique [44].

2.2.2 Energie de traitement

L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie: l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel).

Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication.

2.2.3 Energie de communication

L'énergie de communication se décline en trois parties : l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergie en état de veille. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance ; quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur.

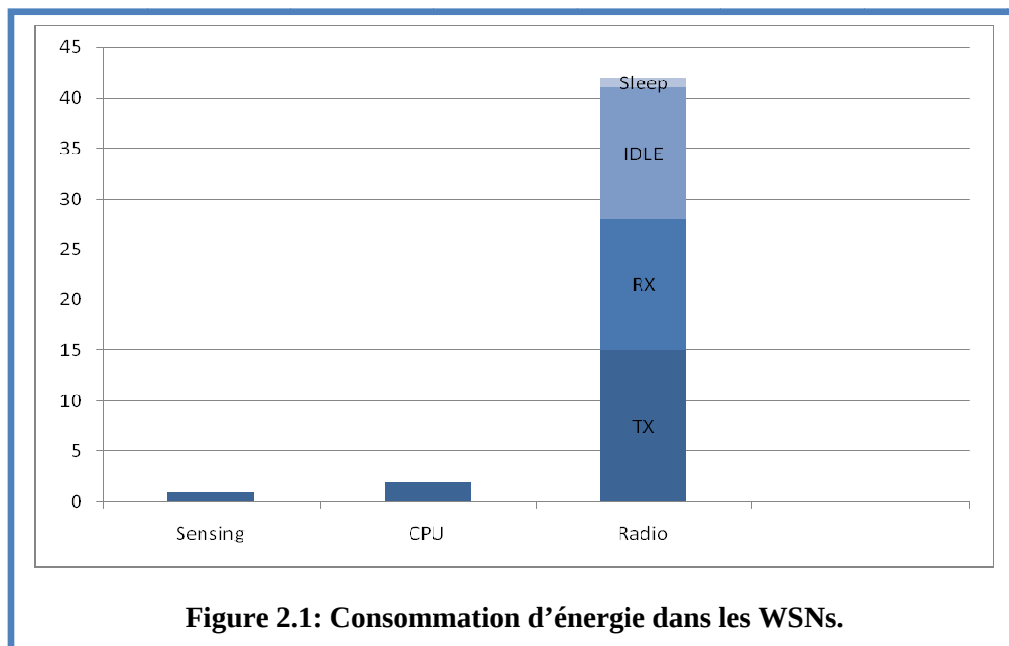


Figure 2.1: Consommation d'énergie dans les WSNs.

2.3 Facteurs intervenant dans la consommation d'énergie

La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs dépend de plusieurs facteurs. Dans ce qui suit, nous présentons les principales sources de perte d'énergie.

2.3.1 Etat du module radio

Pour assurer la communication entre les éléments du réseau, les capteurs utilisent leurs modules radio. Ce module est le composant qui consomme le plus d'énergie.

Pour ce module radio, quatre états de fonctionnement peuvent être distingués: sommeil, actif, réception et transmission:

- ✦ Etat sommeil : la radio est mise hors tension.
- ✦ Etat actif : La radio est allumée, mais elle n'est pas employée. En d'autres termes, le nœud capteur n'est ni en train de recevoir ni de transmettre. Cet état provoque une

perte d'énergie suite à l'écoute inutile du canal de transmission. Pour éviter cette perte d'énergie, un capteur ne doit s'activer qu'en cas de nécessité, et le reste du temps il doit se mettre dans l'état sommeil.

✦ Etat de transmission : la radio transmet un paquet.

✦ Etat de réception : la radio reçoit un paquet.

Dans la plupart des cas, la consommation d'énergie est relativement élevée dans le mode actif, puisque ce dernier nécessite que le module radio soit mis sous tension et décode continuellement les signaux radio afin d'apercevoir l'arrivée des paquets. Comme première solution, mettre le module radio en état de sommeil. Le passage fréquent de l'état actif à l'état sommeil peut avoir comme conséquence: une consommation d'énergie plus importante que de laisser le module radio en mode actif. Cela est dû à la puissance nécessaire pour la mise sous tension du module radio. Cette énergie est appelée l'énergie de transition. Il est ainsi souhaitable d'arrêter complètement la radio, plutôt que de transiter dans le mode sommeil. Le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC [45].

2.3.2 Accès au médium de transmission

Le bon fonctionnement du réseau dépend, dans une large mesure, sur l'efficacité du contrôle d'accès au médium de transmission c.à.d. le protocole MAC utilisé. Ce dernier assure l'accès au support de transmission, le contrôle de flux, la fiabilité de la communication, la détection des erreurs et la retransmission des paquets en cas de collisions. En effet, la couche MAC essaye de faire en sorte que les transmissions de deux nœuds ne seront pas interférées les unes avec les autres et par conséquent coordonner les transmissions des différents capteurs pour minimiser les collisions et réduire la perte d'énergie [46].

Les principales causes de perte d'énergie au niveau de la couche MAC sont [47] :

Retransmission due à la collision ou la congestion

La communication dans les réseaux de capteurs est généralement par diffusion radio. Ce mode de communication est caractérisé par sa non fiabilité : si plusieurs capteurs émettent de façon simultanée il y a un risque de collision et aucun paquet ne pourra être reçu correctement (les paquets seront corrompus). Afin d'assurer une transmission robuste, un nœud capteur ayant détecté une collision doit retransmettre son paquet de données. En raison de la capacité limitée du canal sans fil, le réseau peut courir un risque de congestion si la quantité de messages échangés entre les nœuds est très élevée. Dans ce cas, une retransmission des données perdues est inévitable.

Ecoute active

Un nœud ne sait pas quand il sera le destinataire d'un message envoyé par l'un de ses voisins, pour cela il doit tenir sa radio en mode active tout le temps. Ceci est connu sous le phénomène de l'écoute active (idle listening) du canal.

Pour cette raison, une énergie supplémentaire est perdue. Cette énergie consacrée à l'écoute d'un canal vide (dans les réseaux de capteurs le canal est libre la plupart du temps) est considérable par rapport à l'énergie consommée dans la réception ou l'émission des données.

Sur écoute (over hearing)

Les données transmises par un nœud capteur peuvent atteindre d'autres nœuds qui se trouvent dans sa portée de transmission. Ceci est dû au partage du médium de communication sans fil (tous les nœuds communiquent via un médium commun). Un nœud peut alors recevoir des paquets qui ne lui sont pas destinés.

Surémission (over mitting)

Le phénomène de surémission se produit quand un capteur envoie les données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. En effet, ces messages envoyés sont considérés inutiles et consomment une énergie additionnelle.

Surcharge (over head)

Plusieurs protocoles de la couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle, dans le but est d'assurer différentes fonctionnalités tels que: la signalisation, la connectivité et l'établissement de plan d'accès pour éviter les collisions. Tous ces messages échangés nécessitent une énergie additionnelle. Par exemple, les trames de contrôle RTS/CTS (*Request To Send/ Clear To Send*) ne véhiculent aucune information alors que leur transmission consomme de l'énergie.

Taille des paquets

La taille des messages échangés dans le réseau a un effet sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni trop grande ni trop petite. Si la taille est petite, le nombre de paquets de contrôle (acquittements) généré augmente l'over head. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour transmettre ces paquets de grande taille.

2.3.3 Classe d'application

Les applications dans les réseaux de capteurs sont classées en quatre catégories : orientées temps (*time driven*), orientées événements (*event driven*), orientées requêtes (*query driven*) et hybride [17]. Le type d'application a un impact direct sur la fonction de capture, le taux des données transmises et la topologie du réseau, et par conséquent, sur la durée de vie totale du réseau. Par exemple, dans un réseau *time driven*, approprié à des applications nécessitant un prélèvement périodique de données, si les durées inter transmission sont élevées, dans ce cas, la consommation d'énergie est minimale. Ce prélèvement périodique de données est inadapté pour les applications *event driven* qui sont généralement des applications temps réel, où les capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit. Pour cela, les capteurs doivent réagir et donner des réponses rapides à l'occurrence de cet événement. Ce type de scénarios exige que les nœuds contrôlent leurs radios continuellement, ce qui consomme de l'énergie. De plus, les alarmes qui sont remontées à la station de base doivent respecter certains délais de transmission.

Alors que dans un scénario orienté requête, un capteur n'envoie l'information que suite à une demande explicite de la station de base. Dans ce cas, la consommation d'énergie est liée aux exigences de l'utilisateur (délais de réponse, taux de transfert et nombre de requêtes).

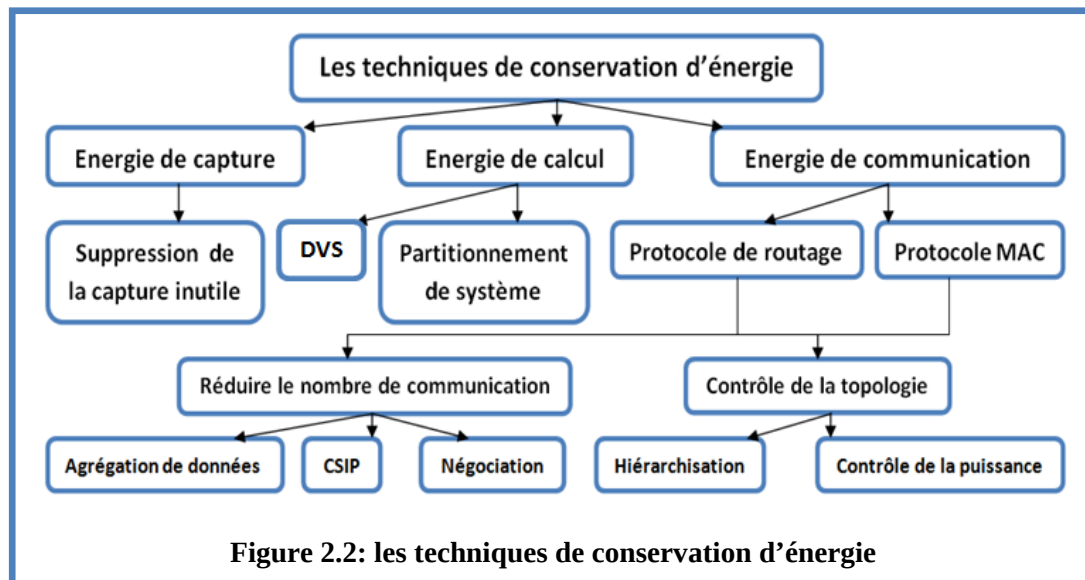
2.3.4 Routage de données

Les réseaux de capteurs sont basés sur un routage multi sauts. L'acheminement des paquets d'une source donnée à une destination se fait à travers plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi, un nœud consomme l'énergie soit pour transmettre ses données ou pour relayer les données des autres nœuds. Une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau. C'est pour cela, l'énergie est considérée comme ressource très précieuse dans les réseaux de capteurs dont les protocoles de routage doivent tenir compte.

2.4 Techniques de minimisation de consommation d'énergie

Dans les réseaux ad hoc, la consommation de l'énergie a été considérée comme un facteur déterminant mais pas primordial car les ressources d'énergie peuvent être remplacées par l'utilisateur. Ces réseaux se focalisent plus sur la QoS (*Quality of Service*) que sur la consommation de l'énergie. Par contre, dans les réseaux de capteurs, la consommation d'énergie est très importante puisque généralement les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile voire impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau.

Après la description des principales causes de consommation d'énergie dans les RCSF, nous présentons dans ce qui suit les différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation. Ces techniques sont appliquées soit au niveau de la couche liaison soit au niveau de la couche réseau. Le schéma suivant présente les principaux axes que nous avons identifié dans la tentative de faire de la gestion d'énergie, problématique essentielle pour la démarche générale de concevoir et optimiser les réseaux de capteurs sans fil.



L'énergie du capteur peut être économisée soit au niveau de la capture, au niveau de traitement ou au niveau de la communication. Le choix de la stratégie se fait, en fonction du contexte et de l'application.

A. La seule solution apportée pour la minimisation de la consommation d'énergie au niveau de la capture consiste à réduire les fréquences et les durées de captures. Dans le cas où les utilisateurs ont besoin d'une interaction continue avec l'environnement surveillé, donc l'activité de nœuds capteurs doit s'effectuer sans interruption, ce qui impose une détection permanente des informations, nous ne pouvons pas réaliser une économie d'énergie à ce niveau.

B. L'énergie de calcul peut être optimisée en utilisant deux techniques :

- ✦ L'approche DVS (*Dynamique Voltage Scaling*) [48] qui consiste à ajuster de manière adaptative la tension d'alimentation et la fréquence du microprocesseur pour économiser la puissance de calcul sans dégradation des performances.
- ✦ L'approche de partitionnement de système qui consiste à transférer un calcul prohibitif en temps de calcul vers une station de base qui n'a pas de contraintes énergétiques et qui possède une grande capacité de calcul [49].

C. La minimisation de la consommation d'énergie pendant la communication entre les éléments du réseau reste la solution la plus exploitée. L'explication est simple : elle est directement liée à l'architecture des protocoles de communication, qui représente la partie la plus complexe et en même temps la plus facile à exploiter pour faire de l'optimisation. Les couches les plus concernées sont : liaison de données et réseau. Ces solutions sont étroitement liées aux protocoles développés pour la couche réseau et la sous-couche MAC. Ces protocoles se basent sur plusieurs techniques : l'agrégation de données, la négociation, la hiérarchisation, le contrôle de la puissance des nœuds et à la technique CSIP (*Collaborative Signal and Information Processing*).

L'agrégation de données et la négociation sont utilisées dans le but commun de diminuer le nombre de messages envoyés et réceptionnés. Par conséquent, la communication va être plus fiable et l'énergie économisée va prolonger la durée de vie du réseau. Une stratégie efficace de niveau réseau est le contrôle de la topologie, comme la hiérarchisation du réseau en plusieurs niveaux. Le contrôle de la puissance de transmission joue aussi un rôle sur la durée de vie du réseau en diminuant la puissance d'émission, et donc les collisions avec d'autres nœuds qui sont aussi en train de transmettre.

La technique CSIP est une discipline qui combine plusieurs domaines [50] : la communication et le calcul à basse puissance, le traitement de signal, les algorithmes distribués, la tolérance aux fautes, les systèmes adaptatifs et la théorie de fusion des capteurs et des décisions. Ces techniques ont le but de réduire le nombre d'émission/ réception des messages.

Une autre possibilité pour faire de l'économie d'énergie est d'introduire, si l'application le permet, plusieurs états de fonctionnement pour les capteurs.

2.5 Routage dans les réseaux de capteurs

2.5.1 Facteurs pour le développement de protocole de routage

La conception des protocoles de routages pour les réseaux de capteur sans fil, est influencée par beaucoup de facteurs qui doivent être surmontés. Dans ce qui suit, nous récapitulons certains des défis [71]:

Evolutivité

L'évolutivité est un facteur important dans les réseaux de capteurs sans fil. Une zone de réseau n'est pas toujours statique, elle change selon les besoins des utilisateurs. Tous les nœuds dans le domaine du réseau doivent être évolutifs ou être en mesure de s'adapter aux changements dans la structure du réseau en fonction de l'utilisateur.

Energie

Chaque nœud utilise peu d'énergie pour des activités telles que la détection, le traitement et la transmission. Un nœud dans le réseau doit savoir combien d'énergie sera utilisée pour effectuer une nouvelle tâche à laquelle il est soumis. L'énergie consommée peut varier selon le type de fonctionnalité ou l'activité qu'il a à accomplir.

Temps de traitement

Il se réfère au temps pris par le nœud dans le réseau pour assurer l'ensemble de l'opération commençant par la détection, le traitement ou le stockage des données, la transmission ou la réception sur le réseau.

Schéma de transmission

La transmission de données par les nœuds de capteurs vers la destination ou la station de base se fait par un schéma de routage à un seul saut ou à multi saut.

Capacité du réseau

Tous les nœuds du réseau de capteurs utilisent certaines ressources du réseau qui les aident à accomplir certaines activités comme la détection ou la transformation.

Synchronisation

Dans les communications radio entre les nœuds capteurs d'un WSN, les capteurs écoutent en permanence les transmissions et consomment de l'énergie s'ils ne sont pas synchronisés les uns les autres. Pour cela, un nœud doit avoir la même notion de temps pour se mettre en veille et se réveiller que ses voisins.

Contrôle de paquets

Un paquet envoyé avant la transmission entre deux nœuds est appelé le paquet de contrôle. Le paquet de contrôle contient le nombre de bits de données envoyés, l'adresse du nœud de destination et certaines informations qui contribuent à éviter les collisions pendant la transmission.

Mobilité

La mobilité de la station de base et/ou des nœuds capteurs intervient aussi lors de la conception des protocoles de routages. Par exemple, un réseau avec une station de base fixe qui reçoit les données à partir d'un nœud distant nécessite des protocoles de routage différents de celui d'un réseau ayant une station de base mobile.

2.5.2 Métriques de mesure d'efficacité d'un protocole de routage

Les métriques de routage sont des valeurs généralement appelée *coûts* ou *poids* calculées selon un ou plusieurs paramètres tels que le nombre de saut, le taux de perte d'énergie, la bande passante etc. Généralement plus la métrique est petite, plus le lien/route est de bonne qualité. La métrique d'une route est le cumul (addition, multiplication, moyenne etc.) des métriques des liens qui composent cette route.

Une métrique doit pouvoir quantifier de manière précise l'état du réseau pour que le protocole de routage puisse choisir les routes les plus adéquates à tous moment. La récupération de ces informations peut se faire avec différentes méthodes, Il existe principalement trois méthodes:

- ✦ Les méthodes dites *actives* consistent à injecter périodiquement des paquets de contrôle dans le réseau et récupérer ces informations, l'avantage est que les mesures sont relativement précises, l'inconvénient est que les paquets de contrôle engendre un trafic sur le réseau.
- ✦ Les méthodes dites *passives* utilisent le trafic courant (paquets de données) pour effectuer ces mesures. Cette méthode évite la surcharge inutile du réseau.
- ✦ Les méthodes dites *hybrides* utilisent en même temps les méthodes passives et actives.

Dans un réseau plusieurs paramètres peuvent influencer sur le routage. Il est donc important de prendre en considération le maximum de métriques possible.

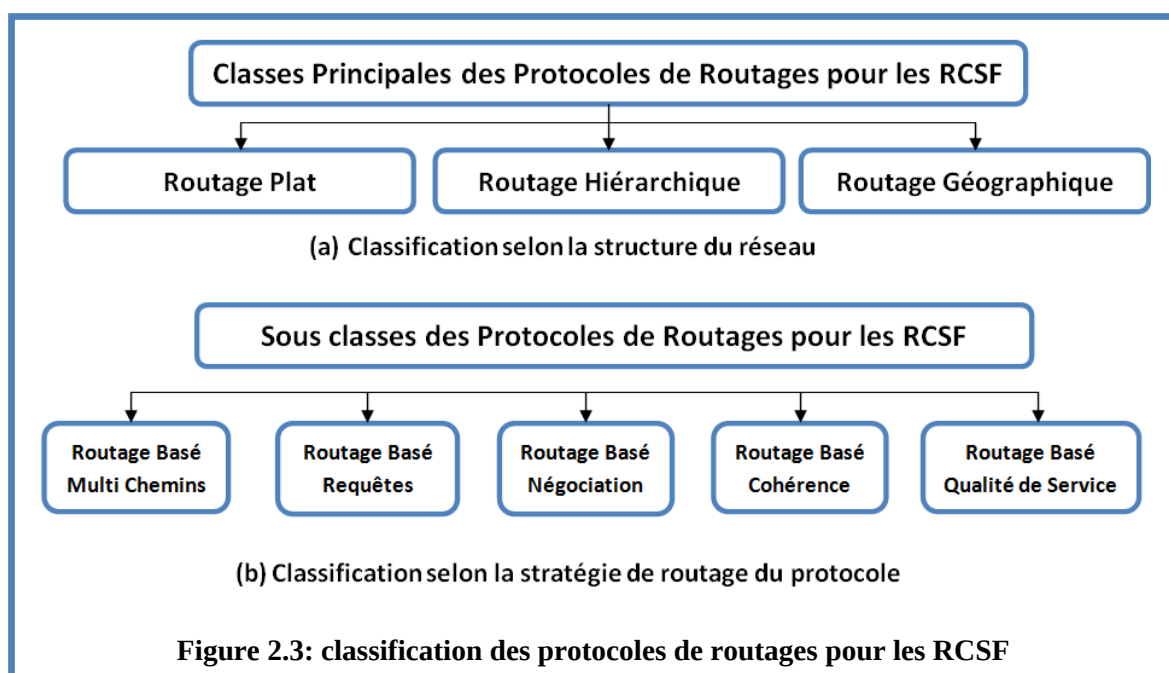
Dans le cadre des réseaux de capteurs les métriques les plus utilisés sont les suivantes:

- ✦ Nombre de sauts.
- ✦ Temps de traverser d'un saut.
- ✦ La quantité d'énergie consommée par le nœud émetteur.
- ✦ Temps du premier nœud à mourir.
- ✦ Temps du dernier nœud à mourir.
- ✦ La bande passante.

2.6 Classification des protocoles de routage

Les protocoles de routage dédiés aux RCSF sont nombreux, mais ils sont, dans la plupart des cas, conditionnés par le type de l'application visée. Les auteurs dans [20] distinguent deux classes de protocoles de routage. La première classe regroupe les protocoles basés sur la structure du réseau tandis que la deuxième classe englobe les protocoles basés sur le fonctionnement intrinsèque du protocole.

Selon cette classification, un protocole de la deuxième classe peut aussi se retrouver dans la première classe. Par conséquent, nous proposons une classification plus cohérente en trois classes principales et cinq sous-classes (Figure 2.3). La première classe principale est formée de protocoles considérant un réseau plat, la deuxième classe englobe les protocoles hiérarchiques et la dernière classe regroupe les protocoles géographiques (Figure 2.3 (a)). Chacune des classes principales peut être décomposée en cinq sous-classes, ceci en fonction de la stratégie de routage utilisée par le protocole. Cette stratégie peut être basée à la fois sur les chemins multiples, les requêtes, la négociation, la cohérence des données, ou encore la qualité de service (Figure 2.3 (b)).



2.6.1 Classes principales des protocoles de routage

Cette section présente trois classes principales de protocoles de routage dédiés aux RCSF, à savoir les protocoles utilisant le routage plat, le routage hiérarchique ou le routage géographique. Ces classes sont données dans la figure 2.3 (a).

Routage plat

Dans le routage plat (*flat routing*), tous les nœuds jouent typiquement le même rôle, les nœuds capteurs collaborent pour accomplir la tâche globale du réseau. En raison du nombre important des nœuds capteurs, il n'est pas faisable d'assigner un identifiant pour chaque nœud. Cette considération a mené au routage centré données, où la station de base envoie des

requêtes à certaines régions du réseau et attend des retours de données à partir des nœuds capteurs situés dans ces régions.

Puisque les données sont demandées par le biais de requêtes, la désignation des attributs est nécessaire pour indiquer les propriétés de ces données. Des premiers travaux sur le routage centré-données, tels que les protocoles SPIN [52, 53] et la diffusion dirigée [54, 55], ont enregistré une économie d'énergie grâce à la négociation entre les nœuds du réseau et l'élimination des données redondantes.

Routage hiérarchique

Les méthodes de routage hiérarchique ont des avantages spéciaux liés au passage à l'échelle et à l'efficacité dans la communication. Par exemple, elles sont utilisées pour exécuter un routage avec économie d'énergie dans les RCSF. Dans une architecture hiérarchique, des nœuds à grande énergie peuvent être employés pour traiter et envoyer l'information, alors que des nœuds à énergie réduite peuvent assurer la capture à proximité de la cible. La création des clusters et l'assignation des tâches spéciales aux têtes de clusters peuvent considérablement renforcer le passage à l'échelle, l'augmentation de la durée de vie et l'efficacité énergétique du système global. Le routage hiérarchique est une manière efficace de réduire la consommation énergétique dans un cluster en exécutant l'agrégation et la fusion de données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la station de base [56].

Routage géographique

A l'inverse des approches traditionnelles, le routage géographique présente des propriétés intéressantes pour les réseaux maillés sans fil spontanés : il n'exige aucune information sur la topologie globale puisqu'un nœud choisit le prochain saut parmi ses voisins sur la base de la localisation de la destination. En conséquence, le mécanisme de routage supporte le passage d'échelle, parce qu'il utilise seulement des décisions locales. Le routage géographique est simple, parce qu'il n'exige pas de tables de routage de sorte qu'il n'y ait aucune surcharge de contrôle pour leur création et maintenance. La jointure du réseau est également simple, parce qu'un nouveau nœud a besoin seulement d'une adresse basée sur sa localisation géographique. De telles adresses peuvent être obtenues à partir d'un dispositif dédié, par exemple GPS (*Global Positioning System*) [51], ou par l'application de mécanismes d'auto localisation [57, 58]. La variante la plus familière du routage géographique est la transmission en mode glouton (*greedy*) dans lequel un nœud transmet le paquet au voisin le plus proche de la destination [59, 60]. La transmission en mode glouton fonctionne en boucle ouverte, mais des paquets peuvent être supprimés au niveau des nœuds bloqués qui ont seulement des

voisins dans la direction inverse par rapport à la destination. Les nœuds bloqués apparaissent dans quelques places proches des zones non couvertes (des vides) ou près des obstacles à l'intérieur du champ de déploiement du réseau. L'économie en énergie augmente ainsi en fonction du nombre de nœuds en état de veille dans le réseau. La manière de déterminer les périodes de veille pour chaque nœud, d'une façon localisée, a été présentée dans [62, 61].

2.6.2 Sous-classes des protocoles de routage

Chaque classe principale de protocoles (Figure 2.3 (a)) peut à son tour donner naissance à cinq sous-classes, selon la stratégie de routage du protocole : routage basé sur les chemins multiples, routage basé sur les requêtes, routage basé sur la négociation entre les nœuds, routage basé sur la cohérence des données, ou routage avec qualité de service. Ces sous-classes, sont données dans la figure 2.3 (b).

Routage basé sur les chemins multiples

Les protocoles de cette sous-classe utilisent des chemins de routage multiples au lieu d'un chemin unique entre une source et une destination. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la vraisemblance qu'un chemin alternatif existant entre une source et une destination lorsque le chemin principal échoue. Cette tolérance peut être renforcée en découvrant des chemins multiples entre la source et la destination aux dépens d'une consommation énergétique et d'un trafic de contrôle supplémentaires. Ces chemins alternatifs sont maintenus en veille par la source en envoyant des messages périodiques. Par conséquent, la fiabilité du réseau peut être augmentée tout en accusant une surcharge de contrôle supplémentaire pour garantir la validité des chemins alternatifs.

Routage basé sur les requêtes

Dans le routage basé sur les requêtes, les nœuds propagent de voisin en voisin une requête pour données émise par un nœud du réseau, et les données correspondant à la requête seront envoyées au nœud qui a initié la requête.

Généralement, ces requêtes sont décrites dans un langage naturel ou des langages d'interrogation de niveau élevé. Par exemple, dans une application de type militaire, le client C1 peut soumettre une requête au nœud N1 et demander : Y a-t-il des véhicules en mouvement dans la région 1 du champ de bataille ? Tous les nœuds disposent des tables de requêtes reçues pour des tâches de capture, et envoient les données associées aux tâches une fois obtenues. La diffusion dirigée est un exemple de ce type de routage, où le nœud station de base envoie des messages d'intérêt aux nœuds capteurs [54]. Pendant que le paquet d'intérêt

est propagé dans tout le réseau, les gradients de la source à la station de base sont de nouveau installés.

Lorsque la source a des données pour l'intérêt, elle les envoie le long du chemin du gradient d'intérêt. Pour diminuer la consommation énergétique, l'agrégation de données est exécutée sur la route.

Routage basé sur la négociation entre les nœuds

Ces protocoles emploient des descripteurs de données à un niveau élevé afin d'éliminer la transmission des données redondantes sur la base de la négociation.

Des décisions de communication sont également prises sur la base des ressources disponibles au niveau des nœuds capteurs. SPIN [52, 53] est un exemple de protocoles de routage via la négociation. La motivation principale réside dans le fait que l'utilisation de l'inondation pour dissémination produira la duplication des données envoyées, ainsi les nœuds recevront les copies doubles des mêmes données. Cette opération consomme un surplus d'énergie et de traitement en envoyant les mêmes données par différents capteurs. SPIN est conçu pour disséminer les données d'un nœud à tous les autres nœuds, en supposant que ces capteurs sont de potentielles stations de base. Donc, l'idée principale du routage via la négociation est de supprimer l'information double et d'empêcher l'envoi des données redondantes au prochain capteur ou à la station de base, en échangeant une série de messages de négociation avant même la transmission effective des données.

Routage basé sur la cohérence des données

Le traitement de la cohérence des données est une phase importante dans le fonctionnement des RCSF. Par conséquent, des algorithmes de routage utilisent différentes techniques pour traiter la cohérence (ou la non cohérence) des données circulant dans le réseau. En général, les nœuds capteurs coopèrent entre eux afin de réaliser ce traitement. Dans le routage basé sur la non cohérence des données, ces dernières sont envoyées aux nœuds agrégateurs du réseau après avoir reçu le traitement minimum qui inclut la suppression des doublures [63]. Pour exécuter un routage efficace en énergie, le traitement de la cohérence des données est normalement choisi par le concepteur du protocole.

Routage avec qualité de service

Le principe des protocoles de routage avec QoS se base sur le fait que le réseau doit être capable de satisfaire certaines métriques (latence, énergie des nœuds, bande passante, et.) tout

en acheminant le maximum de données vers la station de base. Il existe plusieurs protocoles de ce type dans la littérature.

2.7 Exemples de protocoles de routages dédiés aux WSN

2.7.1 SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*)

Heinzelman et al, ont proposé une famille de protocoles appelée SPIN, [70] reposant sur un modèle de négociation afin de propager l'information dans un réseau de capteurs. Le but de SPIN est de pallier aux problèmes de l'inondation, qui sont :

- ✦ L'implosion due à la duplication inutile des réceptions d'un même message.
- ✦ Le chevauchement lié au déploiement dense des capteurs. En utilisant l'inondation, les capteurs d'une zone émettent tous la même donnée (ou presque).
- ✦ L'ignorance des ressources, car d'inondation ne prend pas en considération les ressources des nœuds.

Ces trois problèmes affectent grandement la durée de vie et les performances du réseau. Pour les résoudre, SPIN adopte deux principes :

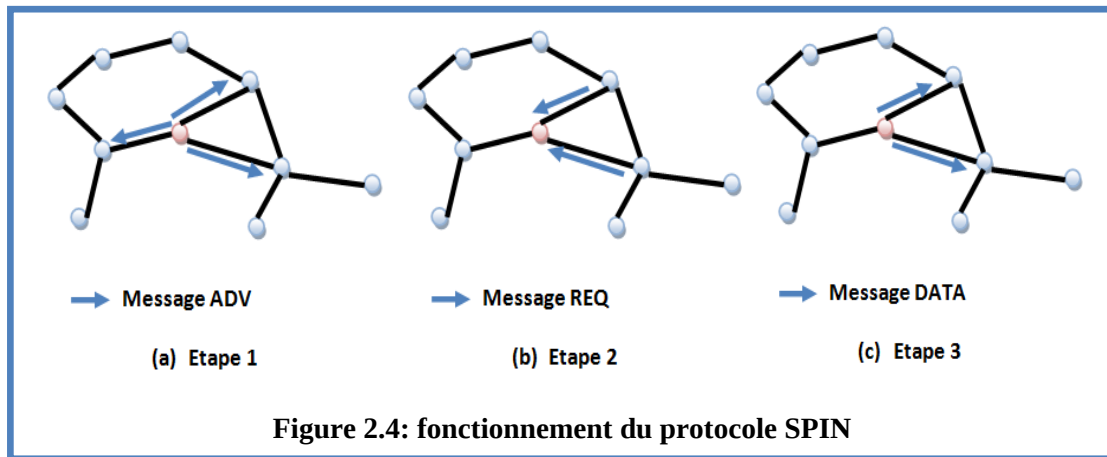
- ✦ La négociation: pour éviter le problème d'implosion, SPIN précède à l'émission d'une donnée par sa description, en utilisant la notion de métadonnées. Le récepteur aura le choix par la suite d'accepter la donnée ou non. Ce mécanisme permet aussi de régler le problème de chevauchement.
- ✦ L'adaptation aux ressources: d'une manière continue, les nœuds contrôlent leur niveau d'énergie. Le protocole SPIN accommode son exécution suivant l'énergie restante du capteur, et modifie en conséquence le comportement du nœud.

Fonctionnement de SPIN

Les communications dans SPIN se font en trois étapes :

- ✦ Lorsqu'un nœud veut émettre une donnée, il émet d'abord un message ADV contenant une description de la donnée en question.
- ✦ Un nœud recevant un message ADV, consulte sa base d'intérêt. S'il est intéressé par cette information, il émet un message REQ vers son voisin.
- ✦ En recevant un message REQ, l'émetteur transmet à l'intéressé la donnée sous forme d'un message DATA.

La figure suivante illustre ces trois étapes :



Remarque

Lorsque le nœud s'aperçoit que son énergie est descendue sous un certain seuil, il change son mode de fonctionnement, et ne répond à aucun message ADV.

2.7.2 DD (*Directed Diffusion*)

[54] Directed Diffusion est un protocole de propagation de données, permettant d'utiliser plusieurs chemins pour le routage d'information. Le puits diffuse un intérêt sous forme de requête, afin d'interroger le réseau sur une donnée particulière. Il se base sur le modèle publish/subscribe. DD repose sur quatre éléments : nomination des données, propagation des intérêts et établissement des gradients, propagation des données et renforcement des chemins.

1. La nomination de données

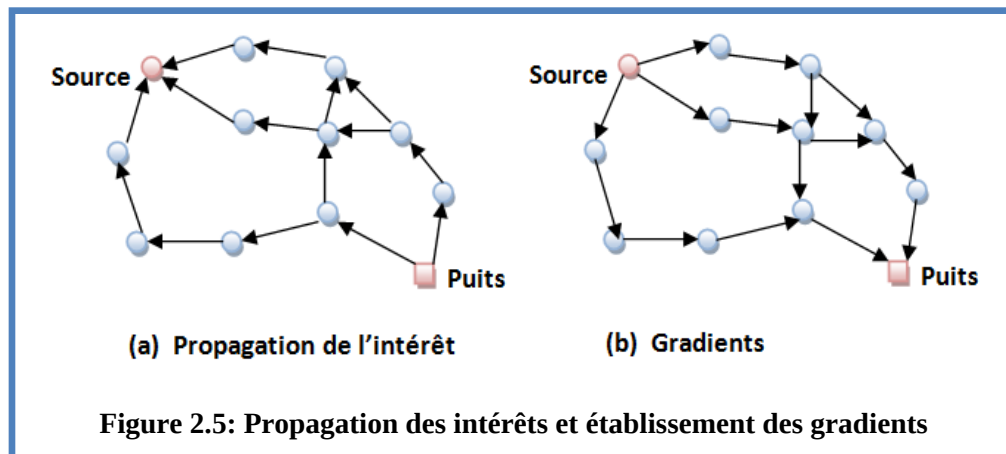
Le nommage de données dans DD utilise un schéma attribut valeur (paires valeur-attribut) afin de décrire les intérêts.

Exemple:

```
Type = Wheeled vehicle      // detect vehicle
locationInterval = 20 ms    // send events every 20ms
Duration = 10 s             // Send for next 10 s
Field = [x1, y1, x2, y2]   // from sensors in this area
```

2. Propagation des intérêts et établissement des gradients

Lorsqu'un puits requiert une donnée du réseau, il propage un intérêt, contenant sa description ainsi que le débit d'information désiré. Initialement, le puits spécifie un grand intervalle, dans un but d'exploration. Cela permet d'établir les gradients et de découvrir d'éventuelles sources, sans pour autant encombrer le réseau.



Propagation des intérêts

Afin de propager l'intérêt, DD emploie l'inondation globale du réseau. Chaque nœud maintient localement un cache d'intérêt contenant les informations suivantes :

- ✦ La description de l'intérêt, en utilisant le schéma de nomination.
- ✦ Un ensemble de gradients.

Gradient

Un gradient est un vecteur représentant l'intérêt. Il est caractérisé par une direction et une amplitude : la direction est modélisée par le voisin émetteur de l'intérêt, et l'amplitude est représentée par le débit de données. En plus, chaque entrée contient un champ limitant la durée de validité du gradient.

Etablissement des gradients

Lorsqu'un nœud reçoit un intérêt, il parcourt son cache :

- ✦ Si le cache ne contient aucune entrée relative à l'intérêt reçu, une nouvelle entrée est créée avec un gradient vers le voisin émetteur.
- ✦ Dans le cas contraire, le nœud recherche un gradient vers le voisin émetteur, et met à jour en conséquence l'entrée en question.

Après le traitement du cache, le nœud relaie l'intérêt vers ses voisins. La méthode la plus simple est d'utiliser l'inondation.

3. Propagation des données

Lorsque l'intérêt atteint les sources ciblées, les capteurs commencent la récolte d'information. Pour un intérêt donné, un capteur calcule le débit le plus élevé et prélève les données. En

consultant les gradients relatifs à l'intérêt, le nœud détermine les prochains sauts vers les puits (chacun avec son propre débit).

Lorsqu'un nœud reçoit une donnée, il recherche un intérêt équivalent dans son cache. Si aucune entrée n'est trouvée, le paquet est supprimé. Dans le cas contraire, en consultant la liste des gradients, le nœud relaie la donnée vers ses voisins, suivant le débit de chacun d'eux.

Eviter les boucles

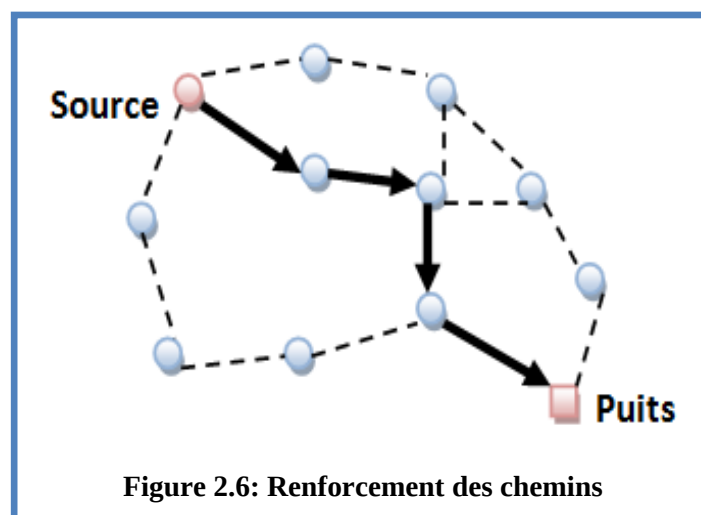
Avant de relayer une donnée à ses voisins, un nœud utilise son cache de données.

Ce cache enregistre les données récemment émises par les voisins. Cela évite la création de boucles, en supprimant les données déjà rencontrées.

4. Renforcement des chemins

Renforcement positif

Lorsque le puits reçoit les premières données, il renforce le chemin vers le voisin émetteur, en augmentant le débit de captage. Cela permet de clôturer la phase d'exploration, et d'entamer la phase de récolte d'information. Le renforcement ne doit pas s'arrêter au niveau des voisins du puits, mais doit se propager éventuellement jusqu'aux sources. Pour ce faire, lorsqu'un nœud reçoit un message de renforcement, il consulte son cache d'intérêt. Si le débit spécifié dans le message est plus grand que tous les autres débits des gradients présents, le nœud doit renforcer un de ses voisins. Le voisin est choisi en utilisant le cache de données.



Renforcement négatif

Dans le cas de panne d'un lien (perte de paquet, débit réduit, etc.) le puits peut envoyer un renforcement négatif sur le chemin en panne en spécifiant le débit de base (exploratoire), et en procédant à un renforcement positif d'un chemin alternatif.

2.7.3 MCFA (*Minimum Cost Forwarding Algorithm*)

Ye et al ont proposé l'algorithme MCFA [69], recherchant un chemin minimal entre la source et le puits, tout en considérant les limites des réseaux de capteurs. Le protocole vise à atteindre trois principaux buts :

- ✦ L'optimalité: en acheminant les données sur des chemins à coût minimum.
- ✦ La simplicité: qui se traduit par une faible consommation en mémoire, et non nécessité d'une identification des nœuds.
- ✦ La scalabilité: étant donnée la faible consommation en mémoire et l'absence d'identificateur de nœuds, le protocole peut être utilisé pour un grand nombre de nœuds. En plus, la phase de construction des routes ne consomme qu'un message par capteur.

Chaque nœud maintient une variable de coût, qui détermine le coût minimal vers le puits sur le chemin optimal. Plusieurs mesures peuvent être employées, suivant l'application voulue: nombre de sauts, consommation d'énergie, . . . etc.

L'algorithme se déroule en deux phases : calcul des coûts, relais des paquets.

1. *Etablissement des valeurs de coût*

Valeur locale

Une solution simple pour la détermination des valeurs locales des coûts est d'utiliser l'inondation. Initialement, le puits émet un message ADV contenant un coût nul. Tous les autres nœuds initialisent leur coût à une valeur infinie. Lorsqu'un nœud reçoit un message ADV, il vérifie si la valeur reçue additionnée au coût du lien est plus petite que la valeur locale. Dans ce cas, le nœud met à jour sa valeur locale et émet un nouveau message ADV.

Optimum global vs consommation d'énergie

Pour prendre en compte les contraintes d'énergie des capteurs, MCFA utilise une méthode qui consomme moins de messages de contrôle. En effet, le problème de l'inondation est la prise de décision en tenant en compte seulement des optimums locaux. Ce qui engendre plusieurs émissions des messages ADV par le même nœud. Pour éviter cela, MCFA utilise un mécanisme de backoff. Le backoff permet de retarder la prise de décision sur la valeur locale du coût, en attendant la valeur optimale globale. L'intervalle du backoff dépend du coût du lien de réception: plus le coût est grand, plus on a de chance de recevoir une valeur plus optimale, donc on doit attendre plus de temps

2. Relais des paquets

Le relais dans MCFA n'utilise aucune identification des nœuds et aucune table de routage. Ce qui rend MCFA assez adapté aux environnements de capteurs.

Lorsqu'un paquet est émis par une source vers le puits, il contient le coût minimal local du nœud. A la réception d'un paquet de donnée, le nœud vérifie si son coût local est égal au coût reçu moins le coût du lien de réception. Dans ce cas, le nœud relaie le paquet en remplaçant la valeur du coût par sa valeur locale

2.7.4 RR (*Rumour Routing*)

Les protocoles précédents utilisent une forme d'inondation pour la propagation des intérêts ou des données. Le protocole Rumour Routing essaie de trouver un compromis entre l'inondation des intérêts et la propagation des données.

Fondements

Les auteurs [57] ont utilisé un procédé probabiliste, reposant sur le fait suivant : Des simulations basées sur la méthode de Monte Carlo ont montré que la probabilité que deux lignes se croisent au sein d'une région rectangulaire est 0.69. De plus, si on utilise 5 lignes passant par un point, la probabilité qu'une autre ligne croise l'une des cinq lignes est 0.997 !

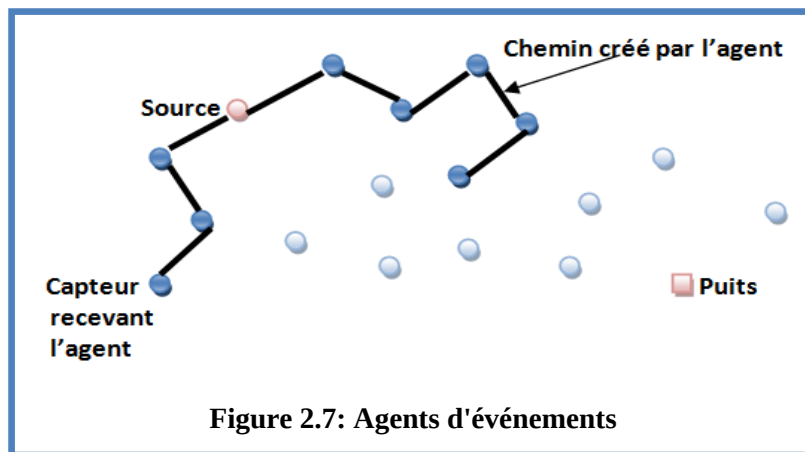
Par conséquent, si on considère le puits et la source comme deux points, et en établissant un nombre réduit de mi chemins depuis la source et le puits, on aura une forte chance que deux mi chemins se joignent, créant ainsi un chemin complet entre la source et la destination, tout en évitant l'inondation. La création de ces mi chemins se base sur la notion d'agent. Un agent est un paquet avec une grande portée (TTL) qui traverse le réseau de nœud en nœud afin d'établir des tables de relais. Il existe deux types d'agents: d'évènement et de requête.

Agents d'évènements

Chaque nœud maintient une table de relais locale, qui contient, pour chaque intérêt, le prochain saut vers le puits et vers la source, ainsi qu'une métrique qui représente le nombre de saut vers chaque extrémité. Lorsqu'un nœud observe un nouvel évènement, il crée un nouvel agent suivant une certaine probabilité. L'agent contient la table d'évènements parcourus au sein du chemin ainsi que le nombre de sauts vers la source de chaque évènement. De plus, l'agent doit transporter avec lui la liste des nœuds parcourus ainsi que leurs voisins directs. La source choisit un voisin aléatoire et lui émet l'agent. Lorsqu'un nœud reçoit un agent, il effectue les opérations suivantes:

- ✚ Si l'agent contient un nouvel évènement, une nouvelle entrée dans la table locale est créée.

- ⊕ Le nœud met à jour sa table locale et/ou la table de l'agent pour les entrées communes, suivant le nombre de sauts optimal: i.e. si l'agent possède une route plus courte vers un certain évènement, le nœud met à jour sa table, et vice-versa. Cette méthode permet d'optimiser des routes déjà établies par d'autres agents.
- ⊕ Si le nœud connaît des évènements non connus par l'agent, il ajoute les entrées nécessaires dans la table de l'agent.
- ⊕ Le nœud choisit comme prochain saut un de ses voisins n'appartenant pas à la liste des nœuds de l'agent, et modifie en conséquence sa table locale pour le prochain saut vers le puits (i.e. le nœud choisi représente le prochain vers le puits).
- ⊕ Le nœud ajoute à la liste des nœuds parcourus son identificateur, ainsi que ceux de ses voisins.
- ⊕ Le message est envoyé au nœud choisi.



Agents de requêtes

Lorsque le puits désire prélever une donnée du réseau, il consulte sa table locale pour une route fraîche. Si aucune entrée n'est trouvée, il initialise un agent de requête. L'agent contient seulement la liste des nœuds visités. Lorsqu'un nœud reçoit un agent de requête, il vérifie l'existence d'un chemin dans sa table locale. Si ce n'est pas le cas, il choisit un voisin aléatoire et lui transmet l'agent, tout en ajoutant son identificateur dans la liste transportée par l'agent.

2.7.5 LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*)

LEACH est l'algorithme de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs [65]. L'idée est de former des clusters de nœuds de capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des clusters heads locaux comme passerelle pour atteindre la destination. Cela permet d'économiser de l'énergie car les transmissions ne sont effectuées que par les clusters head plutôt que par tous les nœuds de capteurs.

2.7.6 PEGASIS & Hierarchical-PEGASIS

PEGASIS (*Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems*) est une version améliorée du protocole LEACH. PEGASIS forme des chaînes de nœuds capteurs plutôt que des clusters afin que chaque nœud transmette et reçoive uniquement des données d'un voisin. Un seul nœud est sélectionné à partir de cette chaîne pour transmettre à la station de base. L'idée de PEGASIS est qu'il utilise tous les nœuds pour transmettre ou recevoir des données avec ses plus proches voisins. Il déplace les données reçues de nœud à nœud, puis les données seront agrégées jusqu'à ce qu'elles atteignent tous la station de base. Donc, chaque nœud du réseau est tour à tour un chef de file de la chaîne, ainsi que responsable pour transmettre l'ensemble des données recueillies et fusionnées par la chaîne de nœuds au niveau de la station de base [66].

2.7.7 TEEN & APTEEN

Les protocoles TEEN (*Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol*) [67] et APTEEN (*Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol*) [68] conviennent pour les applications critiques. Dans les deux protocoles, le facteur clé est la valeur de l'attribut mesuré. La caractéristique supplémentaire d'APTEEN est la capacité de changer la périodicité et les paramètres de TEEN en fonction des besoins des utilisateurs et des applications.

TEEN est conçu pour être sensible à des changements soudains des attributs tels que la température. La réactivité est importante pour les applications critiques dont le réseau fonctionne dans un mode réactif. L'architecture du réseau de capteurs est basée sur un groupement hiérarchique où les nœuds forment des clusters et ce processus va se répéter jusqu'à ce que la station de base soit atteinte.

APTEEN est une extension de TEEN qui fait à la fois la collection des captures périodique de données et qui réagit aux événements critiques. Quand la station de base forme des clusters, les clusters head diffusent les attributs, les valeurs des seuils, ainsi que le calendrier de transmission à tous les nœuds. Le cluster head effectue également l'agrégation de données afin d'économiser l'énergie.

2.7.8 SAR (*Sequential Assignment Routing*)

Est l'un des tous premiers protocoles ayant introduit la QoS dans ses décisions de routage [63]. Celle ci dépend de trois facteurs: ressources énergétiques, QoS sur chaque chemin, et niveau de priorité de chaque paquet. Pour éviter l'échec sur un simple chemin, une approche de routage par chemins multiples et des méthodes de restauration locale du chemin sont

employées par SAR. En tant que tel, SAR est un protocole de routage qui vise à réaliser l'efficacité énergétique et la tolérance aux fautes. De manière synthétique, SAR calcule une métrique pondérée de la QoS comme résultat du cumul de métriques QoS et d'un coefficient de poids associé au niveau de priorité du paquet à router. L'objectif de SAR est de minimiser la moyenne de la métrique pondérée de la QoS durant toute la durée de vie du réseau. Bien que ceci assure une tolérance aux fautes et un recouvrement facile, SAR souffre de la surcharge liée à la maintenance des tables et des états de chaque nœud capteur, particulièrement lorsque le nombre de nœuds capteurs devient très grand.

2.7.9 SPEED (*A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks*)

Est un autre protocole de routage avec QoS pour RCSF qui fournit des garanties temps-réel de bout en bout [64]. Chaque nœud du réseau maintient l'information sur ses voisins et emploie l'acheminement géographique pour trouver les chemins reliant les sources aux destinations. En outre, SPEED tente d'assurer une certaine vitesse de relais des nœuds voisins, de sorte que le délai de bout en bout du paquet soit proportionnel à la distance entre la source et la destination.

SPEED fournit aussi le moyen de faire éviter aux paquets les zones congestionnées du réseau en se basant sur des messages de contre pression. Ces messages sont envoyés par les nœuds congestionnés à leurs nœuds ascendants pour le choix de chemins alternatifs. Comparé à d'autres protocoles, SPEED assure un meilleur fonctionnement en termes de délai moyen de bout en bout, de surcharge de contrôle et du taux de réussite dans l'acheminement des paquets.

Cependant, SPEED ne considère aucune métrique d'énergie dans ses décisions de routage. De plus, il traite un vide comme étant une congestion passagère dans le réseau. Ce traitement n'est pas réaliste, un vide peut en effet rester longtemps dans le réseau. Il ne peut disparaître qu'après un redéploiement de nouveaux nœuds capteurs ou suite à un mouvement de quelques nœuds voisins mobiles pour compléter la zone vide.

2.7.10 Classification des principaux protocoles de routages des WSN

	Structure du réseau	Basé multi chemin	Basé requêtes	Basé négociation	Basé cohérence	Basé QoS
SPIN	Plat	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
DD	Plat	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
MCFA	Plat	Non	Non	Non	Oui	Oui
RR	Plat	Non	Oui	Non	Oui	Non
LEACH	Hiérarchique	Non	Non	Non	Oui	Non
PEGASIS	Hiérarchique	Non	Non	Non	Non	Non
TEEN & APTEEN	Hiérarchique	Non	Non	Non	Oui	Non
SAR	Plat	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
SPEED	Plat	Non	Oui	Non	Oui	Oui

Table 2.1: Classification des principaux protocoles de routage pour les WSNs.

2.8 Conclusion

La technologie des réseaux de capteurs reste très prometteuse, et leur défi majeur est de trouver des protocoles de routage qui prennent en compte plusieurs contraintes:

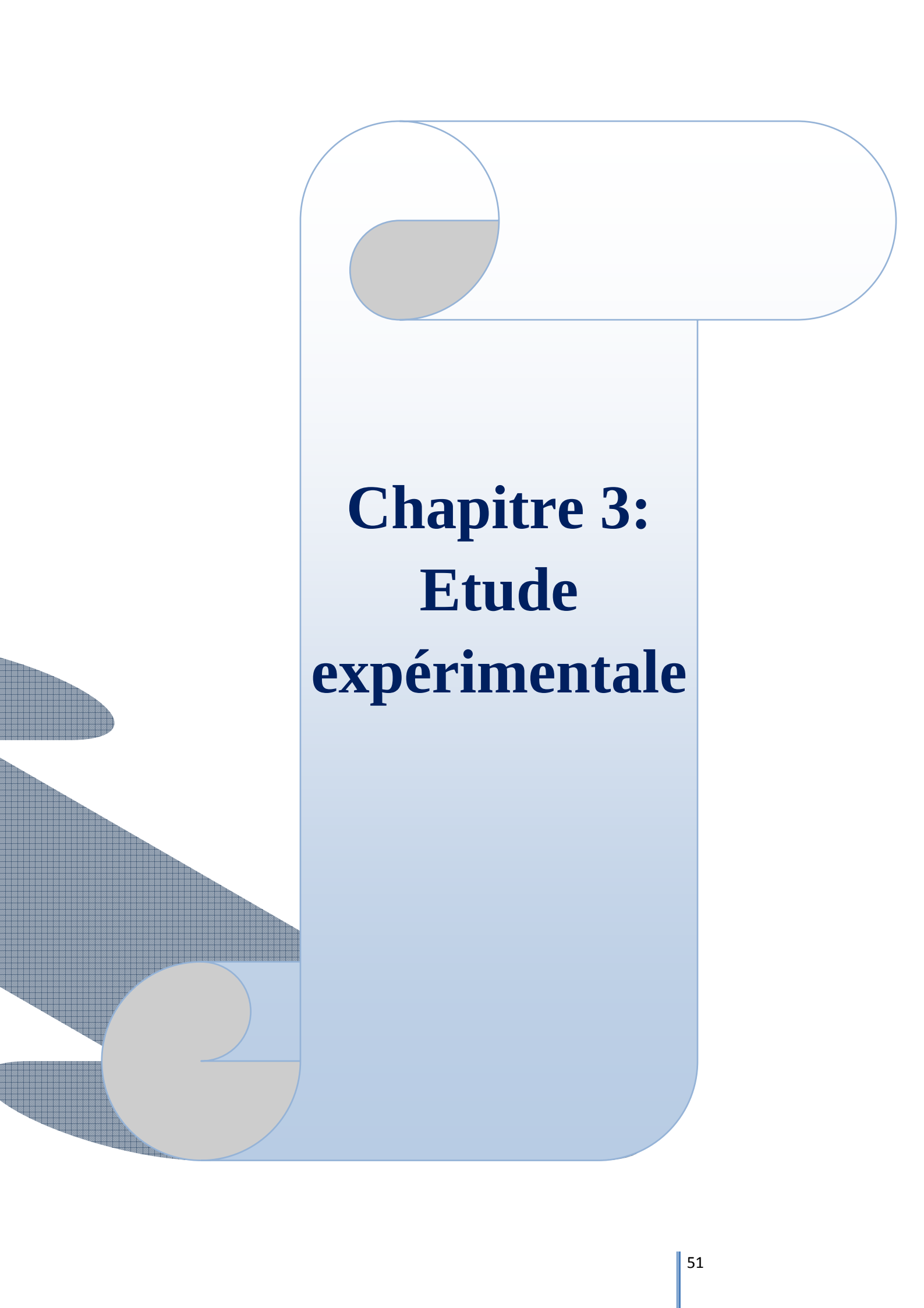
✚ Limitations :

- Contraintes d'énergie : toutes les couches doivent tenir compte de la limitation d'énergie pour maximiser de la durée de vie du réseau.
- Bande-passante

- ✚ Absence d'adressage global
- ✚ Données redondantes
- ✚ Réseau à sources multiples / destination unique
- ✚ Gestion des ressources
- ✚ Capacité de calcul
- ✚ Stockage

Nous allons nous intéresser de plus près à la contrainte énergétique et très exactement aux protocoles de routage qui visent la conservation d'énergie dans les nœuds capteurs.

Dans le chapitre suivant, nous présentons et nous comparons trois protocoles de routages destinés aux réseaux de capteurs sans fil, le premier est un protocole directement connecté, le deuxième est un protocole multi sauts et le troisième est un protocole hiérarchique, la simulation de ces trois protocoles va nous montrer, laquelle de ces trois techniques de routage est plus économe en énergie.



Chapitre 3: Etude expérimentale

3.1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil ont des ressources énergétiques limitées, par conséquent l'utilisation de protocole de routage économe en énergie est important pour ces réseaux. Il existe plusieurs protocoles de routage dans la littérature, l'étude de quelques un d'entre eux est la cible principale du travail présenté dans ce mémoire.

La plupart des algorithmes de routage pour les réseaux de capteurs se concentrent sur l'efficacité énergétique, afin de prolonger la durée de vie du réseau. L'épuisement de l'énergie des capteurs sur les chemins efficaces rend le réseau incapable de surveiller des régions entier et les capteurs qui s'y trouvent deviennent non fonctionnelles. Ainsi, dans la conception des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs, le bilan énergétique est une considération importante pour éviter l'épuisement précoce des capteurs.

On va s'intéresser aux protocoles DC et MTE, qui sont des protocoles de routage pour les réseaux ad-hoc et applicables aux réseaux de capteurs sans fil, DC est un protocole directement connecter alors que MTE est un protocole multi sauts. Et LEACH est le plus célèbre des protocoles de routage hiérarchique destiné aux WSN. La comparaison entre ces protocole va nous permettre de voir qui du routage plat ou hiérarchique est plus adapter pour les WSN

3.2 Motivation

Dans de nombreuses applications de réseaux de capteurs, les événements pourraient se produire de façon aléatoire sur la zone cible, ou de façon répétée à une partie spécifique de cette zone. Par exemple, dans le cas de la génération d'événement répété, seuls les capteurs au sein d'une région R sont sollicités. Avec DC ou MTE, les capteurs de la région R perdent leur énergie rapidement, tandis que d'autres capteurs ont une capacité énergétique importante. Pour éviter cette situation, un algorithme de routage hiérarchique doit être en mesure de distribuer le trafic des données et d'équilibrer l'énergie du réseau.

Pour être efficace un algorithme de routage pour les réseaux de capteurs devraient considérer la quantité d'énergie restant dans chaque capteur, mais aussi de distribuer le trafic sur l'ensemble du réseau, et d'éviter le non fonctionnement des capteurs due à leurs épuisement précoce.

La principale motivation de cette recherche est de trouver les caractéristiques que doit avoir un protocole de routage pour atteindre l'équilibre énergétique, qui va prolongé la durée de vie

du réseau, et lui permettre d'être plus robuste. Cette recherche examine quelque protocole de routage pour comparer les protocoles de routages plat directement connecté et multi sauts au protocole de routages hiérarchiques.

3.3 Les protocoles de routage retenus

Les protocoles de routage utilisé dans les réseaux de capteur dépendent de la topologie du réseau et des paramètres de la radio utilisé, dans ce chapitre, trois protocoles de routage existants, à savoir DC, MTE et LEACH avait été analysé sur la base de la consommation énergétique.

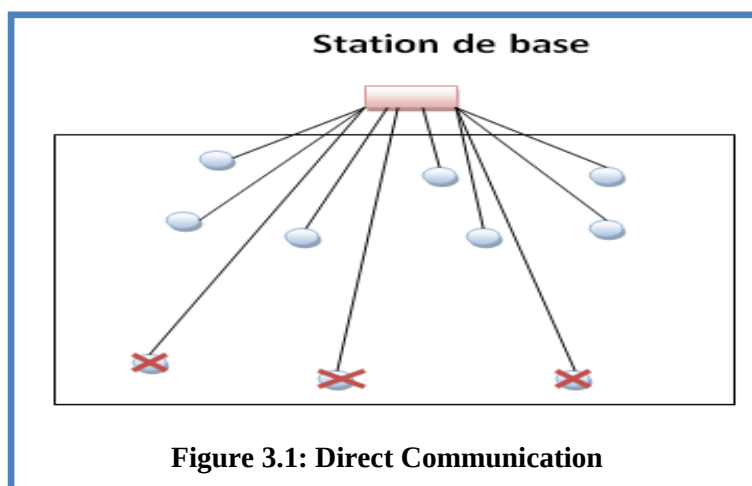
Il est supposé que la station de base est fixe, et que tous les nœuds du réseau sont homogènes et possèdent la même quantité d'énergie résiduelle.

3.3.1 DC (*Direct Communication*)

Le protocole de routage DC [41] à une topologie très simple, on considère que tous les nœuds sont directement connecter à la station de base (voir la figure 3.1), chaque capteur envoie ces données directement à la station de base, la réception des données se fait seulement au niveau de la station de base.

Si la station de base est loin d'un nœud capteur, DC exigera une grande quantité d'énergie à l'émission au niveau du nœud, ce qui réduit considérablement le niveau des batteries des nœuds, et par conséquence la duré de vie du réseau.

Si la station de base est à proximité des nœuds capteurs, ou l'énergie requise pour recevoir les données est importante, DC peut être une solution acceptable (voir même optimale) pour router les données.



3.3.2 MTE (*Minimum Transmission Energy*)

MTE [41] est un protocole de routage à topologie plate, les nœuds capteurs routent les données à destination de la station de base à travers des nœuds intermédiaire, dans ce protocole tous les nœuds du réseau agissent comme des routeurs, les nœuds intermédiaires sont choisis de telle sorte que l'énergie de l'émission du paquet soit minimisée.

Pour router les données, un nœud choisit le prochain saut parmi ses voisins, en choisissant le plus proche de la station de base, de cette manière des routes seront construites. Quand un nœud reçoit des données de l'un de ses voisins en amont, il transmet ces données vers le voisin du saut suivant. Cela continue jusqu'à ce que les données atteignent la station de base. Quand un nœud meure, les voisins qui lui ont envoyé des données vont envoyer directement au prochain saut, de cette manière de nouvelles routes seront créées.

Les nœuds ajustent leur puissance d'émission au minimum nécessaire pour atteindre le prochain saut. Ceci réduit les interférences avec d'autres transmissions et réduit la perte d'énergie au niveau du nœud, et quand des collisions se produisent, les données seront supprimées.

Si le message envoyé traverse n nœuds pour arriver à la station de base, alors l'énergie totale consommée par ce message sera égale à n fois l'énergie à l'émission, plus n fois l'énergie à la réception. Selon les caractéristiques de la radio utilisée l'énergie consommée pour envoyer un message avec MTE peut être plus grande que celle consommée avec CD.

Les nœuds qui sont proches de la station de base vont acheminer un grand nombre de paquets, ainsi ces nœuds vont s'éteindre rapidement, en d'autres termes plus le nœud est proche de la station de base plus il va mourir plus rapidement.

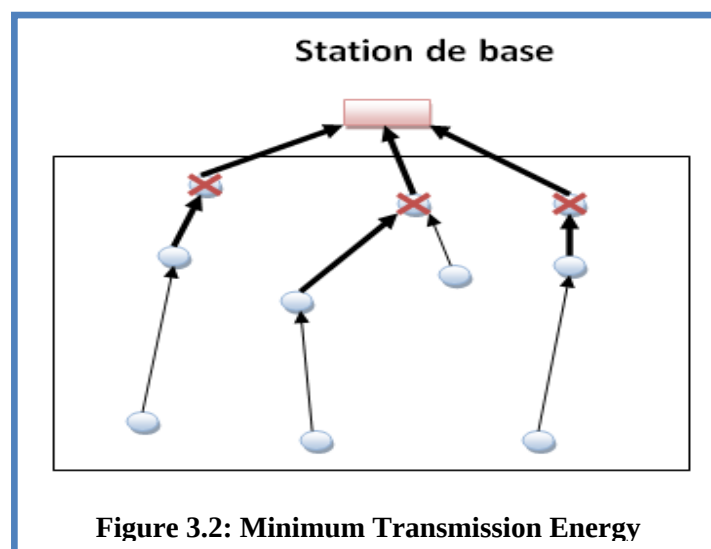


Figure 3.2: Minimum Transmission Energy

3.3.3 LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*)

LEACH [65] est un protocole de routage hiérarchique qui utilise la classification (clustering) afin de diviser le réseau en deux parties : les cluster-heads (chefs de zone) et les nœuds membres. Ce protocole se décompose en deux phases qui se succèdent plusieurs fois: la construction et la communication.

Phase de construction

Dans cette phase, on construit les différents clusters (zones) et on choisit leur chef. Chaque nœud du réseau choisit aléatoirement un nombre et si ce nombre est inférieur à une valeur, le nœud devient chef de zone (cluster-head). Ces chefs de zone sont élus en fonction de la force du signal reçu.

Phase de communication

Les communications à l'intérieur d'une zone (cluster) sont effectuées avec la méthode TDMA (*Time Division Multiple Access*) (mode permettant de transmettre plusieurs signaux sur un seul canal) : chaque chef établit un *schedule TDMA* pour les membres de sa zone en indiquant pour chaque nœud son slot d'émission. Les membres émettent donc les données captées pendant ce slot d'émission. Ce mécanisme permet aux différents capteurs d'éteindre leur interface de communication en dehors de leur slot d'émission, ce qui a pour effet d'économiser leur énergie.

Principe de fonctionnement

Nous avons retenu les travaux de Heinzelman et al, qui présentent aujourd'hui d'excellents résultats en termes d'économie d'énergie. Ces derniers ont proposé le protocole LEACH et une version centralisée de ce protocole, appelé LEACH-C. Tous deux s'appuient sur le clustering (Figure 3.3), qui consiste, de façon similaire aux réseaux téléphoniques cellulaires, à partitionner le réseau en groupes (clusters). Les nœuds transmettent leurs données vers des représentants de groupes dits cluster-heads (CHs), qui à leur tour envoient ces données vers la destination désirée ou la station de base.

Dans certaines applications les cluster-heads font des traitements simples (agrégations par exemple) sur les données reçues avant de les retransmettre à la station de base. Cette approche permet d'économiser la bande passante. Elle offre aussi une meilleure allocation de ressources et aide à améliorer le contrôle de l'énergie dans le réseau.

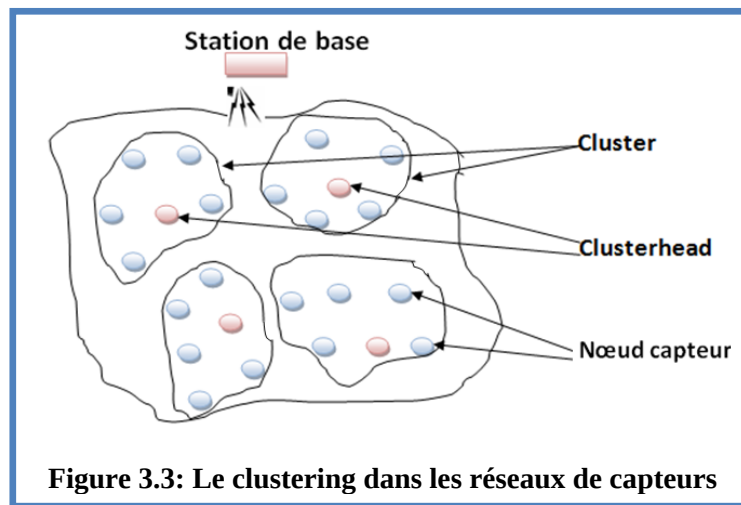


Figure 3.3: Le clustering dans les réseaux de capteurs

Avec le protocole LEACH les agrégations, les compressions ainsi que le routage des données minimisent la consommation d'énergie en réduisant le flux des données et ainsi les communications globales. Les nœuds d'un réseau sont homogènes et ont les mêmes contraintes d'énergie. Le clustering permet aux nœuds d'effectuer des communications sur de petites distances avec leurs CHs, ces derniers ayant pour tâche de communiquer les résultats de leurs calculs à la station de base. Ce protocole présente d'excellents résultats comparés à d'autres algorithmes de clustering.

Dans LEACH, les nœuds s'auto élisent pour être des CHs. Ils se basent sur le pourcentage désiré de CHs et le nombre d'itérations au cours duquel un nœud a pris le rôle de CH. Ainsi, un nœud n prend une valeur aléatoire entre 0 et 1. Si cette valeur est inférieure au seuil $T(n)$, le nœud se déclare CH. Les CHs informent leur voisinage de leur élection. Chaque nœud restant décide de choisir le CH le plus proche.

Après la formation des clusters, chaque CH programme les nœuds appartenant à son cluster en leur envoyant les codes et les fréquences de communication. Chaque nœud, autre qu'un CH, éteint son antenne lorsqu'il ne communique pas ses données.

$T(n)$ est calculé selon la formule suivante :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - p * (r \bmod \frac{1}{p})} & \text{si } (n \text{ appartient à } G) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec : P : pourcentage désiré de CHs.

r : itération actuelle.

G : ensemble des nœuds qui ont été sélectionnés comme CH durant les dernières $(1/P)$ itérations.

Le système fixe le nombre optimal de clusters en fonction de quelques paramètres comme la topologie du réseau, le coût des opérations de communication et de calcul. (Généralement les CHs représentent 5% des nœuds du réseau).

Les CHs reçoivent les réponses des nœuds simples. Ils créent des tables TDMA en se basant sur le nombre de nœuds constituant le cluster.

Chaque nœud transmet ses données vers le CH de son cluster en fonction des intervalles de temps spécifiés dans les tables TDMA. Les nœuds éteignent leurs antennes en attendant leurs temps de parole.

Cette technique permet ainsi de minimiser la dissipation de l'énergie. Par contre, les CHs laissent leurs récepteurs en état de marche pour recevoir toutes les données des nœuds appartenant à leur cluster. Une fois que toutes les données sont reçues, elles sont compressées par les CHs et transmises à la station de base.

Chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation CDMA (*Code Division Multiple Access*), il le transmet aux nœuds appartenant à son cluster afin de l'utiliser pour leurs transmissions, ceci afin de minimiser les interférences entre les messages des CHs les plus proches.

Avantages

Le protocole LEACH présente les avantages suivants :

- ✦ L'auto configuration des clusters se fait indépendamment de la station de base (algorithme distribué).
- ✦ Les données sont fusionnées pour réduire la quantité d'informations transmise vers la station de base.
- ✦ La consommation d'énergie est partagée sur l'ensemble des nœuds prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.
- ✦ L'utilisation des techniques TDMA/CDMA permet d'avoir une hiérarchie et de réaliser des clusters sur plusieurs niveaux. Ces derniers permettent d'économiser d'avantage d'énergie.

Inconvénients

En revanche, LEACH a les inconvénients suivants :

- ✦ Sans justifier leur choix, les auteurs fixent le pourcentage optimal de CHs pour un réseau à 5% du nombre total des nœuds. Néanmoins, la topologie, la densité et le nombre de nœuds peuvent être différents dans d'autres réseaux.
- ✦ Aucune suggestion n'est faite à propos du temps de réélection des CHs (temps des itérations).
- ✦ Les CHs les plus éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à ceux qui sont proches de la station.

Pour éviter ces inconvénients, les auteurs proposent une extension du protocole. Cette fois-ci, ils proposent un algorithme centralisé (LEACH-C). C'est un algorithme itératif, dans lequel la structure des clusters est calculée au niveau de la station de base en utilisant une méthode d'optimisation. Cependant, la station de base affecte dans chaque itération des rôles pour les différents nœuds du réseau (CH ou capteur simple). Ensuite, le fonctionnement continue de la même manière que pour LEACH.

3.3.4 Comparaison de la durée de vie des nœuds avec MTE, DC et LEACH

Les nœuds capteurs peuvent envoyer leurs données à la station de base en utilisant le protocole DC, MTE ou LEACH. Avec DC les nœuds capteurs qui sont loin de la station de base, épuisent rapidement leur énergie parce qu'ils envoient leurs données à la station de base directement, avec MTE les nœuds capteurs ne transmettent pas seulement leurs propres données, mais ils servent aussi de routeurs pour les autres nœuds capteurs, par conséquent, l'énergie des nœuds capteurs qui sont à proximité de la station de base est rapidement consommée. Avec LEACH les cluster-heads s'épuisent plus rapidement si on élève pas des nouveaux cluster-heads périodiquement, il faut bien choisir la période car une période très grande épuisera les cluster-heads avant la fin de la période, et une période très petite fera perdre du temps et de l'énergie durant le processus de réélection de cluster-heads.

Donc :

- ✦ Les nœuds relais vont mourir plus vite en utilisant MTE
- ✦ Les nœuds qui sont plus loin de la station de base, meurent plus vite en utilisant DC
- ✦ La phase de réélection de cluster-heads fait perdre au réseau du temps et de l'énergie.

Dans ce qui suit on va essayer de simuler le fonctionnement de ces trois protocoles, pour voir lequel de ces protocoles est le plus économe en énergie.

3.4 Environnement de simulation

L'apparition des réseaux de capteurs sans fil a ouvert de nombreux aspects pour les concepteurs des réseaux. Traditionnellement, les trois principales techniques pour analyser la performance des réseaux filaires ou sans fil sont les méthodes d'analyse, les simulations informatiques et les mesures physiques. Toutefois, en raison de nombreuses contraintes imposées par les réseaux de capteurs, comme la limitation d'énergie, la collaboration décentralisée, et la tolérance aux pannes, les algorithmes de réseaux de capteurs ont tendance à être plus complexes et souvent défient pour les méthodes d'analyse qui ont été révélées être assez efficace pour les réseaux traditionnels.

De plus, le nombre de réseaux de capteurs existant est relativement petit, cela est dû aux différents problèmes de recherche non résolus, rendant ainsi presque impossible les mesures pratiques. Il semble que la simulation soit la seule approche possible pour l'analyse quantitative dans les réseaux de capteurs. Un environnement de simulation qui teste les protocoles avec une bonne précision serait très bénéfique en termes de temps et de coût.

Avant sa mise en place, un réseau de capteurs nécessite une phase de simulation afin de s'assurer de son bon fonctionnement.

La simulation est la méthode d'évaluation de performances la plus prédominante dans le domaine des réseaux de capteurs. Elle est largement utilisée pour évaluer les nouvelles architectures et protocoles de communication, car elle permet de tester ces nouveaux protocoles et d'anticiper les problèmes qui pourront surgir durant leur implémentation réelle. Pour le faire, elle construit un modèle du système réel en représentant toutes ses entités, leur comportement et leur interaction pour mener en suite des expériences sur ce modèle avec une simple modification des paramètres de simulation dont les résultats seront facilement analysables et interprétables.

Pour simuler les réseaux de capteurs, deux types de simulateurs sont utilisés: les simulateurs dédiés et les simulateurs de réseaux généraux. Les simulateurs dédiés sont conçus particulièrement pour les réseaux de capteurs. Or que, les plus généraux ont été conçus pour modéliser et simuler les réseaux classiques: les réseaux filaires et les réseaux ad hoc. Ces simulateurs ont été adaptés pour pouvoir prendre en charge les particularités des réseaux de capteurs. Les simulateurs les plus utilisés sont NS-2, TOSSIM, OMNET ++, GlomoSim et J-Sim.

Nous donnons un aperçu du simulateur OMNeT ++ que nous avons utilisé et qui a été conçu principalement pour les réseaux de communication et adapter pour les réseaux de capteurs.

3.4.1 OMNet ++

OMNET++ (*Objective Modular Network Test-bed in C++*) [15] est une application développée par Andras Varga, chercheur à l'université de Budapest, il a été conçu en vue de fournir aux chercheurs un meilleur environnement de simulation à événements discrets. Son domaine d'application principal est la simulation des réseaux de communication, mais en raison de son architecture générique et souple, il est utilisé avec succès dans d'autres domaines comme la simulation de systèmes complexes, de systèmes distribués, de MANET, la modélisation des systèmes multiprocesseurs, l'évaluation des aspects de la performance des systèmes logiciels complexes, la validation d'architectures matérielles, etc. Une extension de mobilité pour OMNET est conçue et destinée à simuler les réseaux sans fil et mobiles au sein de simulations OMNET++.

OMNET++ permet la conception des modèles de simulation modulaire, qui peuvent être paramétrable combinés et réutilisés avec souplesse. De plus, l'approche orientée objet de ce simulateur permet l'extension flexible des classes de base fournies dans le noyau du simulateur via la technique d'héritage. Une bibliothèque de simulation complète qui inclut un support pour les entrées/sorties, statistiques, collecte de données, la présentation graphique des données de simulation, des générateurs de nombres aléatoires et structures de données sont proposées dans ce simulateur.

Le noyau de simulation OMNET ++ utilise le langage C ++ qui facilite son intégration avec d'autres applications et environnements de développement. Et pour construire les modèles de simulation: OMNET++ possède une hiérarchie de modules séparés en deux catégories simple et composée. Les modules simples sont programmés en C++, tandis que les modules composés constitués d'un ou de plusieurs modules simples, sont programmés dans le langage de haut niveau NED, sans l'utilisation de scripts, ce qui rend sa configuration pour les différentes simulations très facile. Ces modules peuvent être combinés de différentes manières.

Pour la communication entre les nœuds, on échange des messages. OMNET++ donne aux utilisateurs la possibilité d'étudier l'effet du passage à l'échelle, l'architecture du nœud, l'efficacité énergétique, l'architecture de communications, l'architecture du système, les protocoles, etc.

Le facteur déterminant le temps d'exécution de la simulation est le langage de programmation utilisé. Les simulations sous OMNET++ peuvent être programmées en C ou en C++. Ce sont ces langages qui fournissent les meilleurs temps d'exécution.

Les simulations par OMNET ++ peuvent être exécutées sous différentes interfaces utilisateurs: interfaces graphiques, interfaces d'animation et les interfaces utilisateurs de commande en ligne qui sont les meilleurs. De plus, il est disponible pour les systèmes d'exploitation les plus courants (Linux, Mac OS/X, Windows).

OMNET++ est un outil open source L'accès au code source ne permet pas uniquement de modifier le moteur de simulation mais aide également au débogage des modèles de simulation. Il semble être le meilleur parmi les solutions open source et freeware. Il y a une communauté d'utilisateurs importante. OMNET++ semble séduire de plus en plus la communauté scientifique et un nombre croissant de modèles sont disponibles.

Architecture d'OMNet++

Le fonctionnement d'OMNet++ repose entièrement sur l'utilisation de modules qui communiquent entre eux par le biais de messages. Ces modules sont organisés hiérarchiquement. Les modules de base sont appelés les module simple.

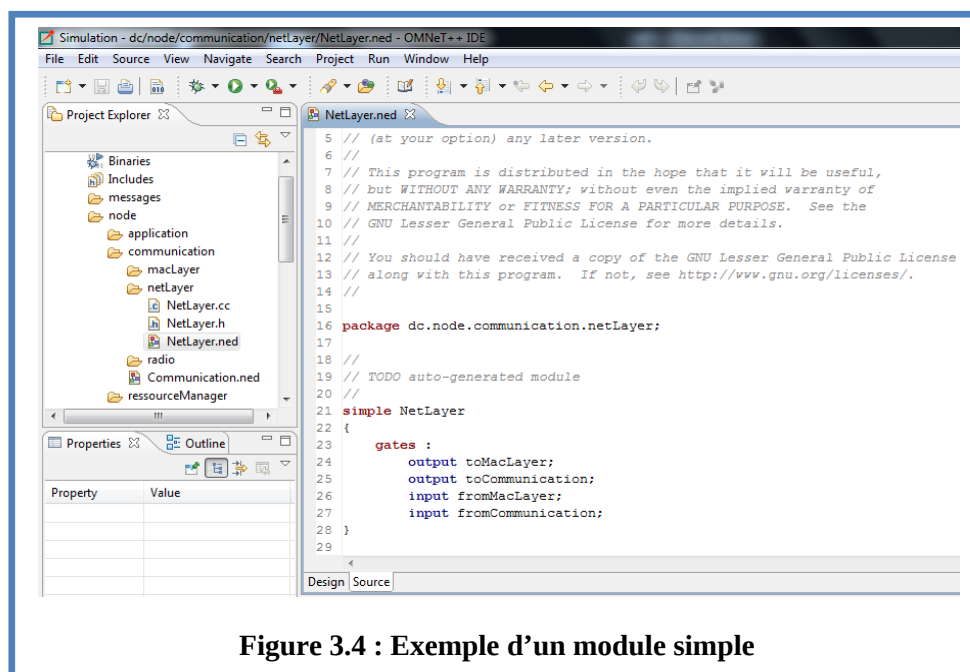


Figure 3.4 : Exemple d'un module simple

Ceux ci sont regroupés en modules composés. Ces modules composés peuvent eux mêmes être regroupés en modules composés. Le nombre de niveau hiérarchique n'est pas limité.

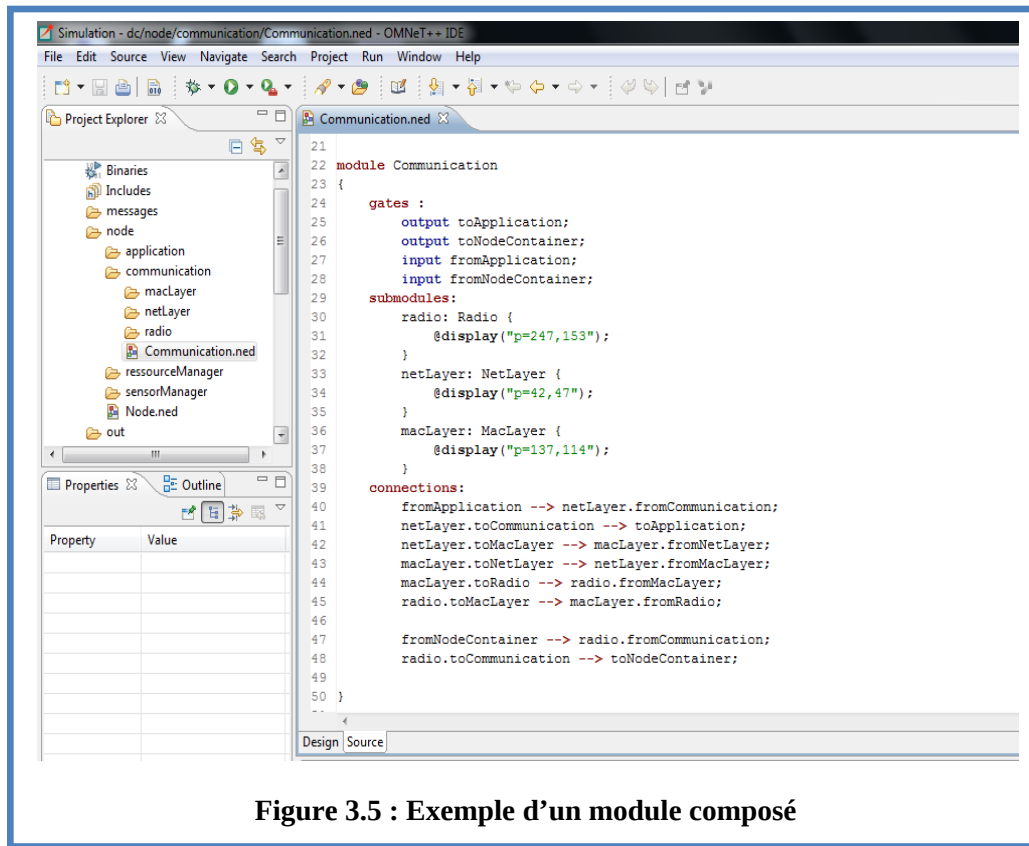


Figure 3.5 : Exemple d'un module composé

L'architecture est construite de telle sorte que les modules simples sont à la fois les émetteurs et destinataires des messages. Les modules composés se contentent de relayer les messages aux modules simples de façon transparente. On peut attribuer différent paramètre aux connections reliant les modules: des délais de propagation, des débits de données, des taux d'erreur, etc.

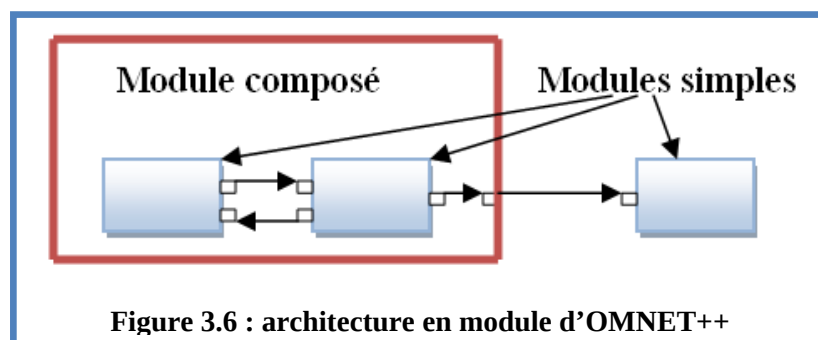


Figure 3.6 : architecture en module d'OMNET++

Les messages sont transmis par le biais de portes (gates). Les portes sont les interfaces d'émission et de réception des modules et une connexion peut relier une porte d'entrée à une porte de sortie. On ne peut créer des connections que dans un seul niveau de hiérarchie des

modules. Il est par exemple impossible de créer une connexion directe entre un module et un sous module d'un autre module de même niveau dans la hiérarchie.

Un exemple de ce type d'architecture peut être deux LANs reliés par un routeur, chaque poste ou élément de chacun des réseaux pourrait être représenté par un simple module, alors que chacun des LANS serait un compound module. Ces deux compounds modules seraient reliés par un simple module qui serait un routeur.

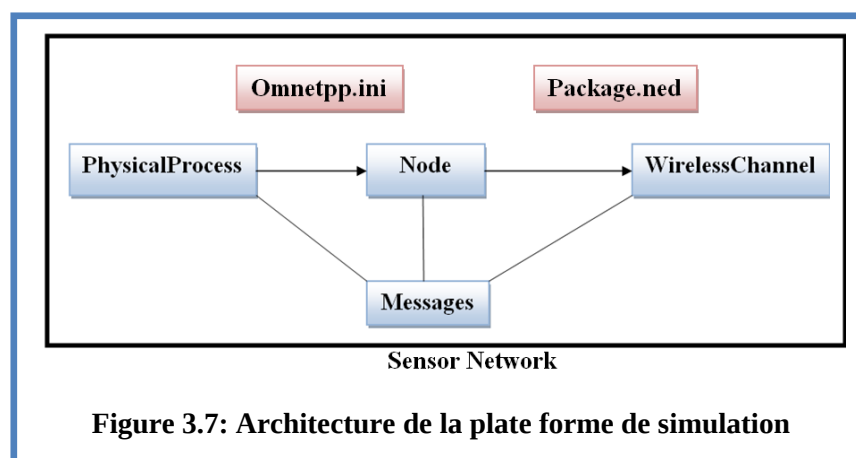
Le langage NED

La définition de la structure d'une simulation et de sa topologie se fait par le biais du langage NED. Une description NED est quasiment toujours constituée de la déclaration de simple module, de définitions de compound modules et une définition de réseau. Typiquement la déclaration d'un simple module décrit les interfaces de ce module et ses paramètres. La définition d'un compound module comprend la déclaration des interfaces externes du module ainsi que la définition de ses sous modules et leur interconnexion. La définition d'un réseau définit l'ensemble d'un modèle comme une instance du type module.

Si la plupart des applications d'édition de topologie ne permettent pas la création que de topologie fixe, NED permet la création de topologies paramétrables. Il est possible de créer des topologies comme : ring, mesh, étoile, tree, etc, dont les paramètres comme la taille, la vitesse des connections, etc. peuvent être modifiés. NED est également compatible avec XML et il est possible d'importer et d'exporter des fichiers XML.

3.4.2 Plate forme de simulation construite

Les différents éléments entrant en action pour mettre en œuvre la plate forme de simulation, sont illustrés sur le schéma ci-dessous :



PhysicaleProcess : représente le phénomène observé.

WirelessChannel : représente le support physique utilisé par les différents nœuds pour communiquer.

Messages : qui sont utilisés pour la communication entre les nœuds.

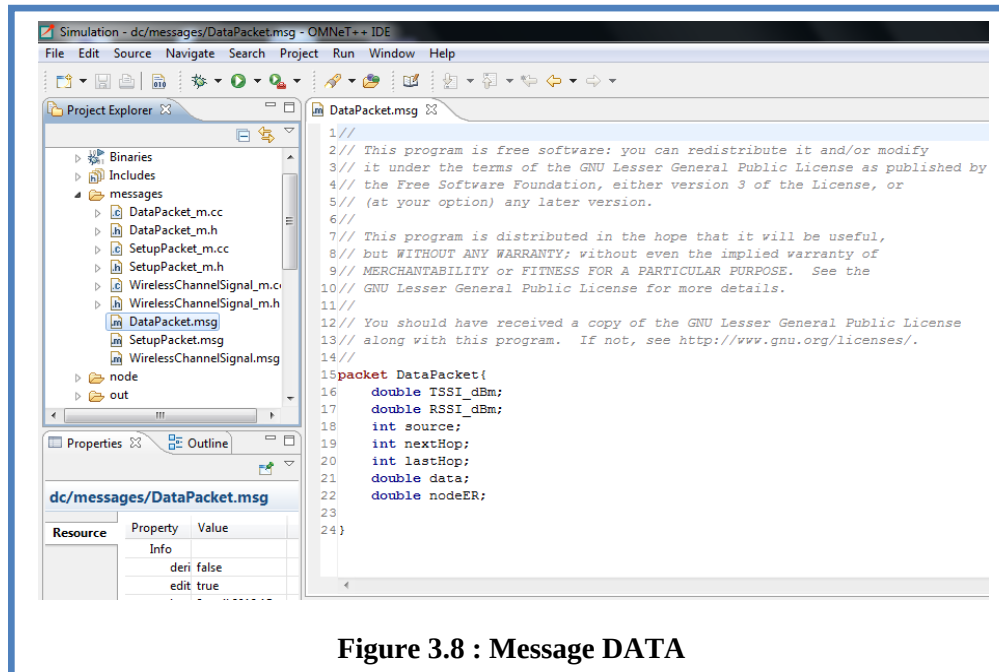


Figure 3.8 : Message DATA

Omnetpp.ini : se sont des fichiers d'initialisation du réseau, pour notre cas en a pris six fichier d'initialisation allons de 100 à 600 nœuds avec un pas de 100.

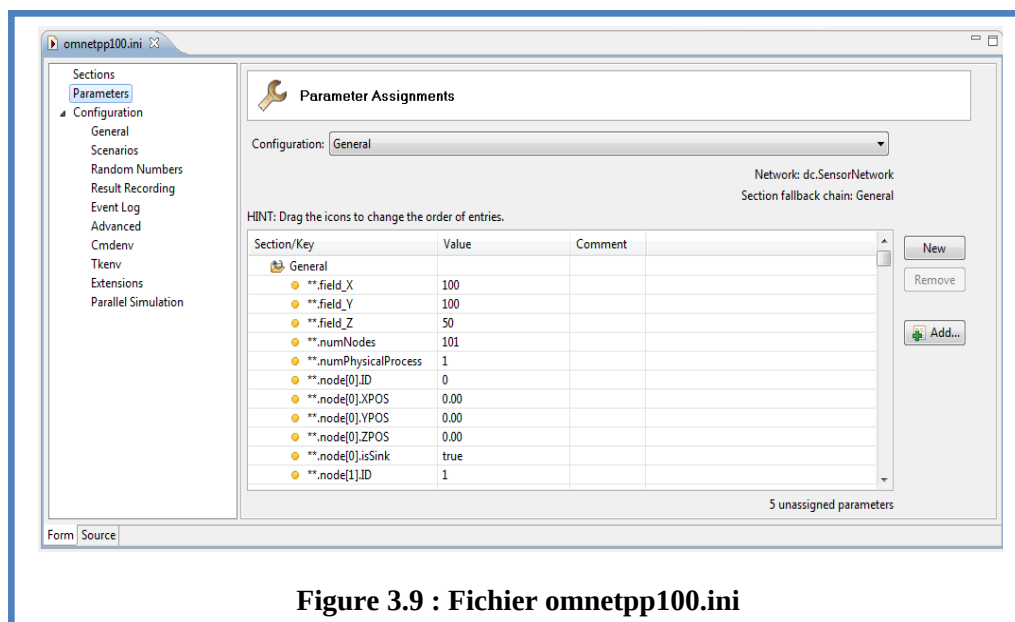
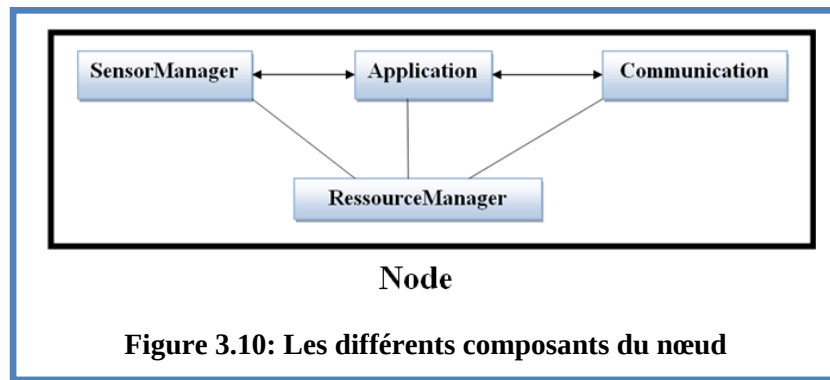


Figure 3.9 : Fichier omnetpp100.ini

Package.ned : c'est un emballage qui contient l'ensemble complet de programmes réalisés pour une application déterminée.

Node : représente les nœuds du réseau (les capteurs). C'est un module composé comme illustré dans la figure suivante :

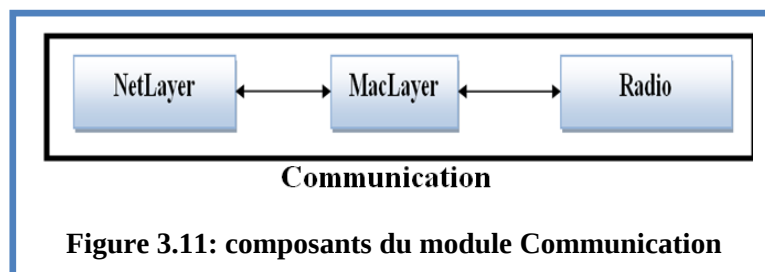


SensorManager : c'est un module composé de deux modules simples, *sinsing* qui s'occupe de la capture du phénomène physique et de l'envoyer à la couche application via un message, et *mobilyser* qui s'occupe de la gestion de la localisation du capteur.

RessourceManager : c'est aussi un module composé de deux modules simples, *battery* qui représente l'unité de contrôle d'énergie ou la batterie, et *CPU* qui représente l'unité de traitement.

Application : c'est un module simple qui représente la couche application de la couche protocolaire.

Communication : c'est un module composé de trois modules simples comme le montre la figure suivante :



NetLayer : représente la couche réseau, le protocole de routage est défini à ce niveau.

MacLayer : représente la couche Mac.

Radio : représente la couche physique.

Au niveau du nœud capteur, lors ce que le phénomène physique est capturé par le module *sinsing*, il est envoyer par le module *SensorManager* ver la couche application, qui traite l'information et l'envoie à d'autres nœuds via le module communication, en traversant les couche *NetLayer*, *MacLayer* et *Radio*. Et pour router les données c'est au niveau de la couche *NetLayer* qu'on défini le protocole de routage à adopté.

Pour pouvoir comparer les trois protocoles de routage étudié, en a construits trois plates formes de simulation suivant le modèle présenté plus haut, qui diffèrent au niveau de la couche Net Layer.

Pour le protocole DC : c'est un protocole où tous les nœuds sont directement connectés à la station de base. Si les paquets de données proviennent de la couche application il les envoie à la couche MacLayer. Si les données proviennent de la couche MacLayer, seulement la station de base les envoie à la couche application, tous les autres nœuds ne vont pas considérer ces paquets.

Pour le protocole MTE : c'est un protocole de routage plat multi sauts. Si les paquets de données proviennent de la couche application il les envoie à la couche MacLayer. Si les données proviennent de la couche MacLayer, seulement la station de base et les nœuds qui sont plus proches de la station de base que le nœud qui a envoyé le paquet, vont l'envoyer à la couche application, tous les autres nœuds ne vont pas considérer ces paquets.

Pour le protocole LEACH : c'est un protocole de routage hiérarchique à deux niveaux. Il y a deux catégories de nœuds : les nœuds capteurs et les nœuds cluster-head. Ce protocole se décompose en deux phases qui se succèdent plusieurs fois : la construction et la communication.

Durant la phase construction, les cluster-head sont élus, la phase de communication consiste à router les données vers la station de base. Les nœuds capteurs envoient leurs données directement à leurs cluster-head, les cluster-head ne reçoivent que les paquets de données provenant des capteurs de leurs propres clusters. Les cluster-head envoient leurs paquets directement à la station de base, le routage inter cluster ressemble au protocole DC.

3.5 Simulation et évaluation des performances

Pour évaluer les performances des trois protocoles de routages DC, MTE et LEACH, nous avons effectué des simulations avec le même scénario de simulation et les mêmes critères d'évaluations de performances pour les trois protocoles.

3.5.1 Scénario de simulation

Pour que l'évaluation des performances des trois protocoles par simulation soit efficace, il fallait qu'on prenne en considération les spécificités des réseaux de capteurs pour qu'elle soit réalisable dans des conditions qui se rapprochent de la réalité. Pour cela, certains paramètres ont été pris en compte lors de la simulation. Ces paramètres sont sélectionnés en se basant sur

des travaux antérieurs pour des applications similaires ainsi que sur la capacité du simulateur. Le tableau ci-dessous résume quelques paramètres utilisés :

Paramètre	Valeur
Nombre de nœuds du réseau	100, 200, 300, 400, 500, 600
Durée de simulation (seconde)	500
Protocoles de routages	DC, MTE et LEACH
Taux de paquet de données généré par un nœud	10/s
Simulateur	OMNET ++
Langage de programmation	Ned, C++
Surface de simulation (m m m)	150 * 150 * 50
Placement des nœuds	Aléatoire
Nombre de stations de base	1
Portée de transmission (m)	Dépond du protocole utilisé

Table 3.1: Paramètres de simulation

Les capteurs utilisés dans la simulation sont considérés comme homogènes: possédant la même quantité d'énergie initiale, capacités de calcul et mémoire, et équipés par les mêmes interfaces de communication. De plus, l'énergie de la station de base est considérée comme illimitée. La position des nœuds dans les topologies générées est réalisée d'une manière aléatoire.

3.5.2 Critères de performance

Pour quantifier les performances des trois protocoles DC, MTE et LEACH, deux métriques sont sélectionnées: moyenne d'énergie consommée, et la durée de vie du réseau. Ces métriques sont affectées par des facteurs comme le nombre de nœuds utilisés dans les scénarios de simulation, le temps de simulation...etc.

Moyenne d'énergie consommée (MEC)

L'un des principaux critères de performances pour un capteur est la durée d'utilisation efficace de son énergie embarquée avant de l'épuiser. Parce qu'une fois qu'elle sera épuisée, il n'y a pas d'autre moyen de recharger à nouveau sa batterie, s'il été déployé à des endroits inaccessibles et n'utilisant pas de cellules solaires.

Ainsi, l'Énergie Consommée (MEC) mesure en moyenne la quantité d'énergie consommée par un capteur. Et la quantité d'énergie consommée par un capteur est obtenue par la formule mathématique suivante :

$$MEC = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}$$

Où :

E_i : l'énergie consommée pour un capteur i . Elle présente la différence entre l'énergie initiale et son énergie résiduelle. Et n : est le nombre de capteurs dans le réseau.

Durée de vie du réseau

Pour mesurer la durée de vie du réseau, nous avons choisi de suivre l'évolution du nombre de nœuds en vie au cours du temps. En effet, cette métrique nous donne un aperçu sur la façon et la fréquence de la mort des nœuds. Elle peut être utilisée pour déterminer la durée de vie du réseau selon le temps qui s'écoule avant que le dernier nœud en vie dans le réseau épuise son niveau d'énergie.

Il est à noter que l'énergie initiale utilisée dans les scénarios de simulation de la durée de vie du réseau est faible pour les nœuds capteurs. Ceci est pour optimiser le temps de simulation et le processus de convergence car avec une quantité d'énergie initiale élevée le temps de simulation s'étend à l'ordre de jours.

3.5.3 Discussion des résultats

Dans ce qui suit, nous allons présenter et analyser les résultats de simulation obtenus suivant les métriques de performances discutées précédemment. Les simulations sont effectuées sur des capteurs déployés de manière aléatoire. Dans tous les scénarios de simulations générés le protocole hiérarchique LEACH est comparé avec les deux protocoles de routages plat DC et MTE, afin de différencier leurs performances.

Afin d'examiner l'influence de la densité du réseau sur les performances des trois protocoles, nous avons mené des simulations en variant le nombre de nœuds déployés dans le réseau (de 100 à 600 nœuds par un pas de 100 nœuds) augmentant ainsi la densité du réseau.

Les résultats de ces tests sont récupérés dans des fichiers sous la forme suivante :

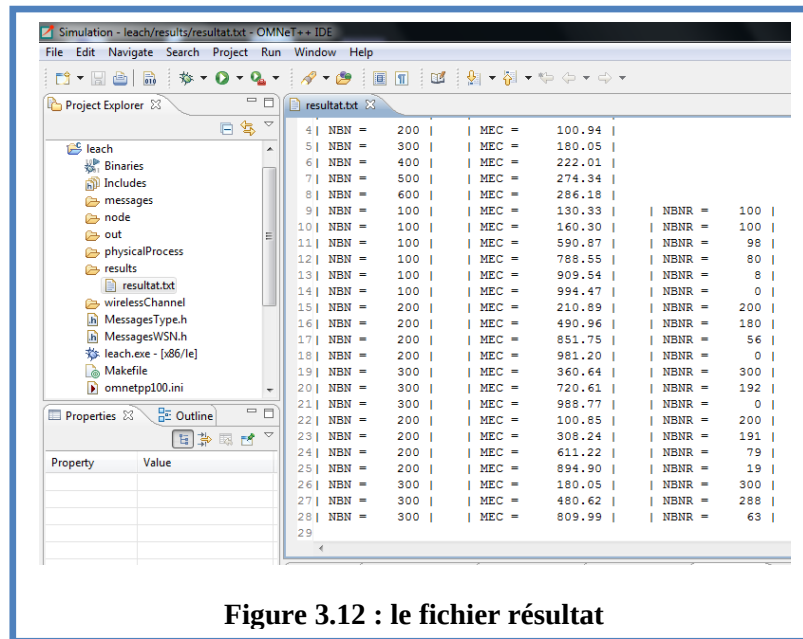


Figure 3.12 : le fichier résultat

Moyenne d'énergie consommée (MEC)

Sur la figure 3.9, on peut voir que le protocole LEACH est plus performant que les protocoles MTE et DC, en marquant moins de moyenne d'énergie consommée (pour 600 nœuds par exemple) par rapport aux deux autres protocoles. Ce gain en énergie est grâce à l'équilibrage dans la distribution de la charge qu'a présenté LEACH entre les différents nœuds.

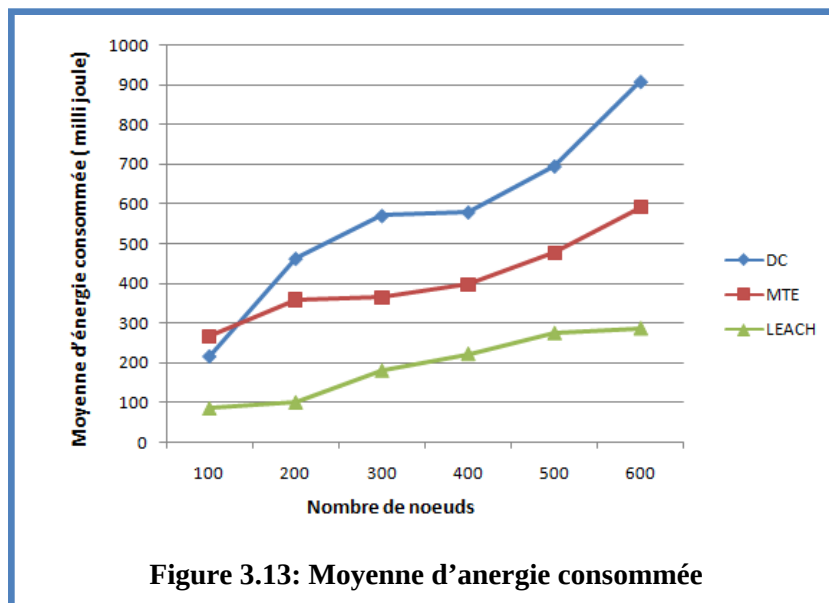


Figure 3.13: Moyenne d'energie consommée

Egalement, on peut remarquer que l'accroissement du nombre de nœuds déployés dans le réseau induit à une augmentation dans la consommation d'énergie dans les trois protocoles.

Ceci est attendu car le fonctionnement de ces trois protocoles est strictement basé sur des interactions locales entre les nœuds voisins. Par conséquent, l'augmentation du nombre de capteurs dans le réseau augmente le nombre de voisins pour chaque nœud, ce qui provoque plus de messages échangés entre ces nœuds et consomme ainsi plus d'énergie dans la communication.

Durée de vie du réseau

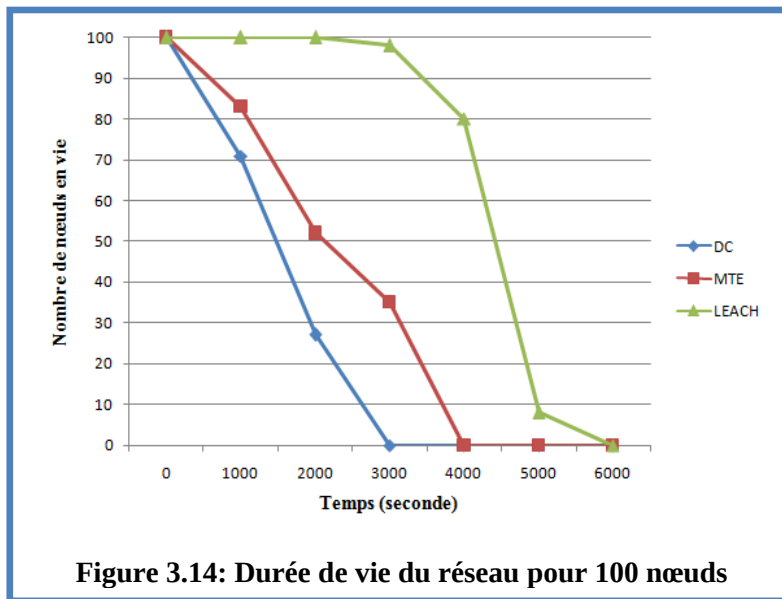
Pour pouvoir étudier la durée de vie du réseau en fonction du nombre de nœuds déployés nous avons suivi l'évolution de 100, 200 et 300 nœuds dans le temps.

La figure 3.10, 3.11 et 3.12 présente l'effet de la densité sur la durée de vie du réseau afin d'examiner l'efficacité des trois protocoles à maximiser la durée de vie des nœuds capteurs et, par conséquent, celle du réseau en entier.

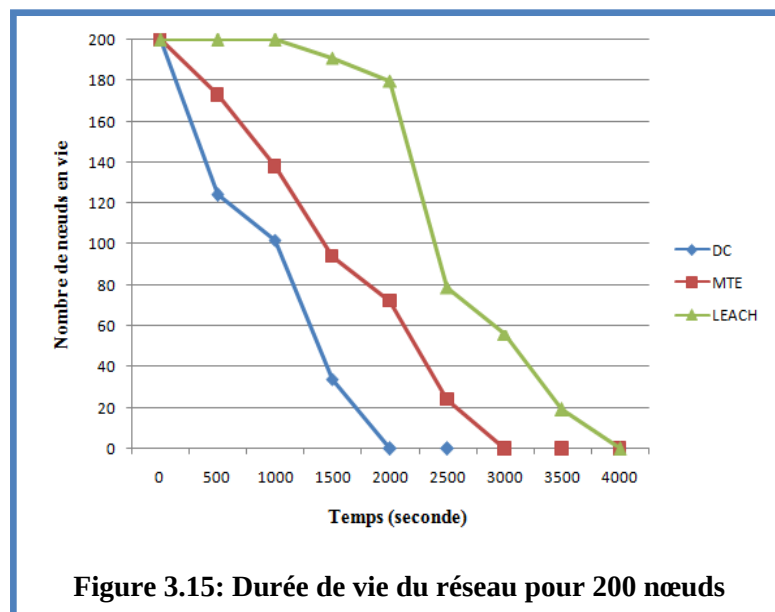
Il est clair, sur ces trois figures ci-dessous, que la durée de vie du réseau offerte par le protocole LEACH est plus performante que celle des protocoles DC et MTE, et ce dans les trois configurations testées. L'explication sera la même que celle donnée pour commenter les résultats du test de la moyenne d'énergie consommée.

Ce que l'on peut également constater c'est que la durée de vie du réseau (liée à l'épuisement de l'énergie du dernier nœud capteur en vie) diminue proportionnellement avec la densification du réseau. Ces résultats s'expliquent par l'augmentation des interférences entre les nœuds voisins avec l'augmentation du nombre de nœuds déployés dans le réseau. Par conséquent, la charge sur le canal de transmission sans fil devient de plus en plus forte dans les trois protocoles ce qui cause plus de consommation d'énergie dans la communication et l'échange des messages, avec comme résultat une dégradation dans la durée de vie du réseau. Mais malgré cela, les résultats montrent clairement que le protocole hiérarchique apporte une amélioration importante à la durée de vie du réseau, par rapport aux deux protocoles plats et ce dans les trois topologies testées.

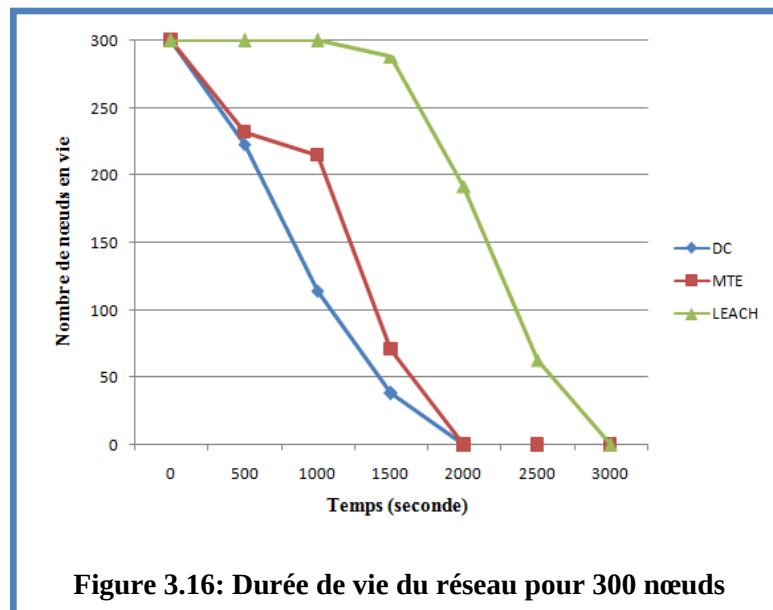
Pour 100 nœuds :



Pour 200 nœuds :



Pour 300 nœuds :



Le processus de clustering a permis au protocole LEACH d'économiser la moyenne d'énergie consommée au niveau des nœuds, et par conséquent de prolonger la durée de vie du réseau, surtout quand le nombre de nœuds est élevé.

Pour conclure nous dirons que les protocoles de routage plats sont plus adaptés aux petits réseaux qui s'étendent sur de petite surface et avec une densité faible, comme les réseaux de domotique. Et que les protocoles hiérarchiques permettent de couvrir efficacement des surfaces plus grandes, avec un nombre de nœud élevé et une forte densité comme les réseaux de contrôle de pollution déployés dans des grandes forêts.

3.6 Conclusion

De nombreux travaux portent aujourd'hui sur l'acheminement d'information dans les réseaux de capteurs sans fil par les capteurs dans un réseau en prenant en considération, en premier lieu, les communications.

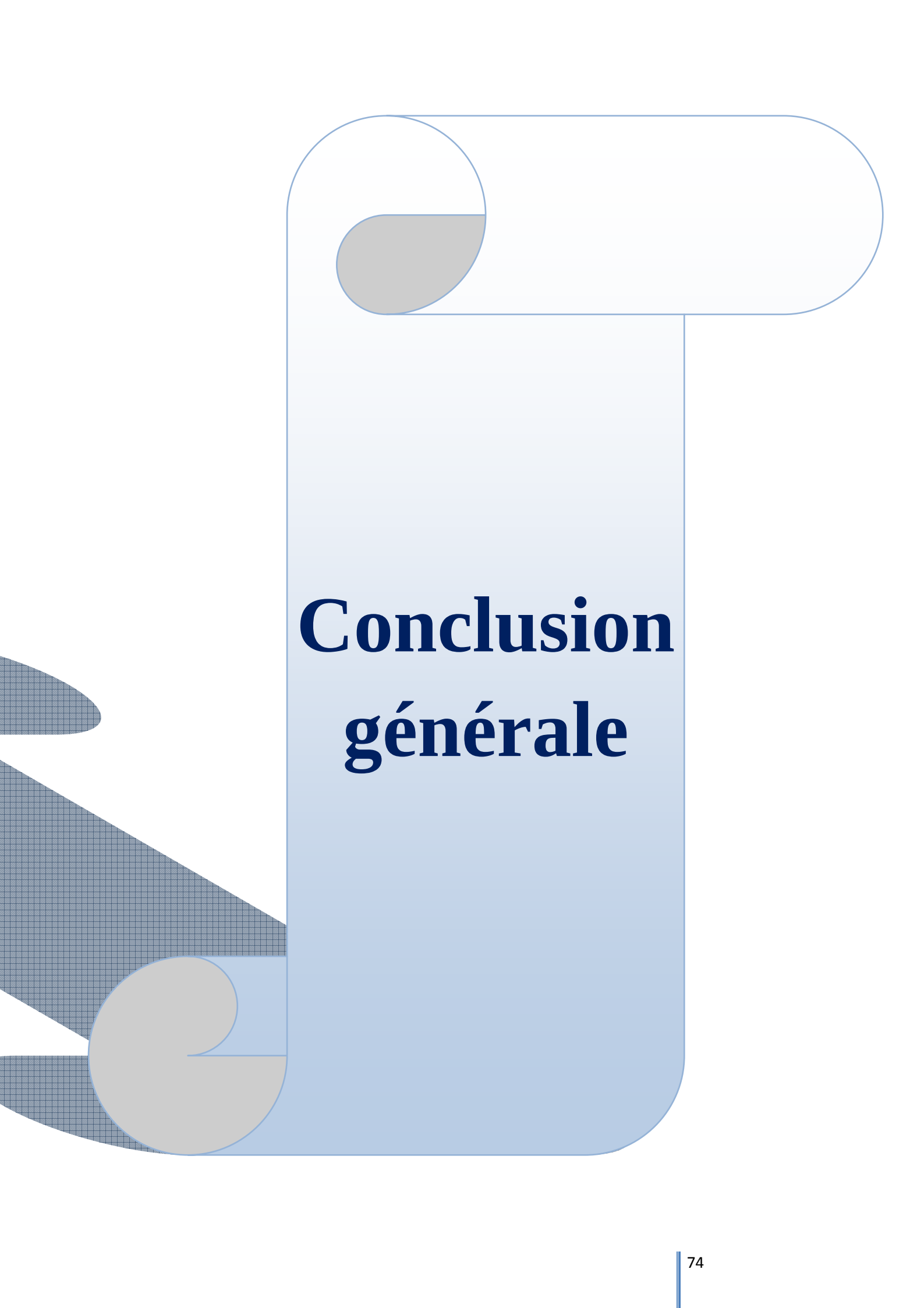
C'est dans ce but que nous avons présenté dans ce chapitre une description de trois protocoles de routage de type de réseaux différents, le protocole de routage hiérarchique LEACH qui répond aux besoins d'un réseau étendu, suit à une approche basée sur des groupes. Cette approche a montré son efficacité, comparée à la topologie plate, en termes de consommation d'énergie prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

Toutefois le protocole LEACH est soumis à certaines contraintes et inconvénients. Par exemple la communication unicast, établie entre le nœud puits et les CHs et entre ces derniers et leurs membres, n'est pas toujours efficace par rapport à la communication multi sauts.

Mais également les chefs de clusters sont soumis à de forte concentration d'énergie du aux données envoyées par leurs membres.

Dans ce chapitre nous avons également étudié deux protocoles de routages plats DC et MTE. Ces deux protocoles restent toujours ouvert pour des nouvelles études pour plus d'amélioration du coté énergie et routage car l'optimisation d'un protocole reste toujours un point critique que la majorité des chercheur essayent d'atteindre.

L'étude comparative menée par simulation entre les performances de ces protocole à était réalisée sur les performances du réseau dans la présence d'un nombre variant des nœuds. Les performances du réseau dans ce test de simulation à été évaluée en fonction de l'énergie consommée.



Conclusion générale

Pour conclure, nous dirons que l'étude qui a fait l'objet de ce mémoire nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des réseaux de capteurs qui est une des technologies clefs de l'avenir et ce en raison de l'incroyable potentiel applicatif qu'elle renferme. Cependant, en raison de la jeunesse de cette technologie, le domaine de réseaux de capteurs soulève d'importantes problématiques de recherche en termes d'organisation, de communication, de gestion, d'exploitation des données récoltées, etc. Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans ce cadre là.

L'utilisation des batteries par les capteurs est une contrainte critique, la deuxième contrainte est environnementale: les capteurs sont parfois déployés sans surveillance et en grand nombre, de sorte qu'il est difficile de changer ou de recharger leurs batteries. Pour cela, les algorithmes et les protocoles de communication pour les réseaux de capteurs doivent minimiser la consommation d'énergie qui reste très variable selon les protocoles utilisés.

Ce mémoire a débuté par une étude générale sur les réseaux de capteurs, en mettant la lumière sur différents concepts, et en regardons les différentes facettes des réseaux de capteurs ainsi que leurs caractéristiques intrinsèques (limitation en énergie, topologie dynamique, mobilité, etc.). Nous avons également accordé une part importante à la dimension applicative (médicale, domotique, militaire, etc.) des réseaux de capteurs. En effet, avec la grande diversité des applications liées à ce type de réseaux, il est très difficile de trouver des solutions (protocoles, algorithmes, etc.) génériques. Nous nous sommes intéressés au problème de l'énergie et du routage dans les réseaux de capteurs sans fil. L'objectif fixé était de comparer entre le routage plat et le routage hiérarchique avec une étude comparative de trois protocoles de routages (DC, MTE et LEACH).

Ces études ont été validées à l'aide du simulateur de réseaux OMNET++. Les résultats des simulations ont bien illustré, pour les trois protocoles proposés leurs billons énergétiques.

Au terme de ce travail on a appris que le routage plat présent des limites quant le réseau s'étend sur une large surface, couverte avec un grand nombre de capteurs, dans cette optique, le routage hiérarchique s'est présenté comme étant une solution prometteuse pour conserver l'énergie des nœuds, et faciliter la transmission des données capturées dans le réseau vers la station de base. L'obtention de meilleures performances pour les réseaux de capteurs avec l'approche de clustering résulte d'une organisation efficace de ses capteurs en clusters.

Enfin nous espérons que notre travail sera bénéfique pour les prochains travaux de recherche dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil pour les promotions à venir.

Perspectives

Les réseaux de capteurs constituent un domaine de recherche très vaste. Ils ont de nombreuses perspectives d'application dans des domaines très variés. Il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans des conditions réelles.

Afin d'être adaptés à un environnement réel, les protocoles étudiés peuvent être toujours améliorés en introduisant la mobilité des nœuds et en tenant compte de la qualité de service, voir même développer de nouveaux protocoles de routages pour les réseaux de capteurs sans fil.

Enfin, les performances des protocoles étudiés ont été prouvées à l'aide du simulateur OMNET++ et il serait préférable de réaliser ces études dans des conditions réelles de manière à comparer les performances réelles par rapport à celles effectuées par des simulations.

Liste des Acronymes

ADC: Analog Digital Converter

APTEEN: AdaPtive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol

CDMA: Code Division Multiple Access

CH: Cluster Head

CSIP: Collaborative Signal and Information Processing

CTS: Clear To Send

DC: Direct Communication

DD: Directed Diffusion

DVS: Dynamic Voltage Scaling

GHz: Giga Hertz

GloMoSim: Global Mobile Simulator

GPS: Global Positioning System

Idle: Ecoute non actif

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

J-Sim: Java-SIMultiaor

LAN: Local Area Network

LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LEACH: Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy

LEACH-C: Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy Centralized

MAC: Media Access Control

MANET: Mobile Ad hoc Networks

MCFA: Minimum Cost Forwarding Algorithm

MIPS: Millions D'Instructions Par Seconde

MTE: Minimum Transmission Energy

NS-2: Network Simulator 2

OMNET ++: Objective Modular NETwork Test-bet in C++

OS: Operating System

OSI: Open Systems Interconnection

PAN: Personal Area Network

PC: Personal Computer

PDA: Personal Digital Assistant

PEGASIS: Power-Efficient GAthering in Sensor Information Systems
QoS: Quality of Service
RCSF: Réseau de Capteurs Sans Fil
RF: Radio Frequency
RR: Rumour Routing
RTS: Request To Send
Rx: Reception
SAR: Sequential Assignment Routing
SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks
SPIN: Sensor Protocols for Information via Negotiation
TDMA: Time Devision Multiple Access
TEEN: Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol
TOSSIM: TinyOS SIMulator
Tx: Transmission
WECA: Wireless Ethernet Compatibility Alliance
WiFi: Wireless Fidelity
WSN: Wireless Sensor Network

Références

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, et E. Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”. IEEE Communications Magazine, August 2002.
- [2] Manel KHELIFI, “ Optimisation de la consommation de l’énergie et maximisation de la durée de vie des réseaux capteurs sans fil ”, Université de Bejaïa, 2008
- [3] Jon S. Wilson, “Sensor Technology Handbook”, Elsevier, 2005.
- [4] Bhaskar Krishnamachari, “Networking Wireless Sensors”, Cambridge University Press, 2005.
- [5] <http://www.technologyreview.com/>
- [6] Pierre Parrend, “Localisation dans les Réseaux de Capteurs”, INSA Lyon, 2005.
- [7] Ananthram Swami, Qing Zhao ,Yao-Win Hong ,Tsing Hua Lang Tong, “Wireless Sensor Networks Signal Processing and Communications Perspectives”,Wiley edition, 2007.
- [8] E.M. Petriu, N.D. Georganas, D.C. Petriu, D. Makrakis, and V.Z. Groza, “Sensor-based information Appliances”, IEEE Instrumentation Measurement Magazine, December 2000.
- [9] Edgar Chavez, Nathalie Mitton, et Hector Tejeda, “Routing in Wireless Networks with Position Trees”, ADHOC-NOW France, 2007.
- [10] B. Jung et G. Sukhatme, “Multi-target tracking using a mobile sensor network”. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2002.
- [11] F. Koushanfar, M. Potkonjak, et A. Sangiovanni-Vincentelli, “Fault Tolerance in Wireless Ad hoc Sensor Networks”. Proceedings of IEEE Sensors 2002, June 2002.
- [12] L. Paradis et Q. Han, “A Survey of Fault Management in Wireless Sensor Networks”. Plenum Press New York, NY, USA, 2007.
- [13] K. Baumgartner, “Réseaux de capteurs sans fil”, IBCOM, Décembre 2005.
- [14] Philip Levis, David Gay, et David Culler, Bridging the Gap, “Programming Sensor Networks with Application Specific Virtual Machines”, OSDI, 2004.
- [15] The OMNeT++ Discrete Event Simulator System, [En ligne], <http://www.omnetpp.org/>.
- [16] François Ingelrest, “Protocoles localisés de diffusion et économie d’énergie dans les réseaux ad hoc et de capteurs”, Thèse de doctorat, le 30 juin 2006.
- [17] kemal Akkaya, Mohamed Younis, “A survey on routing protocols for wireless sensor network”, Ad Hoc Networks, Vol. 3, 2005.
- [18] Guillermo BARRENETXEA, “Distributed Routing Algorithms For Sensor Networks”, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.

- [19] Youssef, Mohamed El-Sheimy, Naser; "Wireless Sensor Network: Research vs. Reality Design and Deployment Issues", Communication Networks and Services Research CNSR '07, Mai 2007.
- [20] J.N. Al-Karaki et A.E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: a Survey", In IEEE Wireless Communications, Volume 11, ISSN: 1536-284, December 2004.
- [21] Eiko Yoneki, Jean Bacon, "A survey of Wireless Sensor Network technologies: research trends and middleware's role", university of Cambridge, September 2005.
- [22] I. KHELLADI, N. BADACHE, "Les réseaux de capteurs: état de l'art, rapport de recherche ", laboratoire LSI USTHB, février 2004.
- [23] R. Meraihi, "Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc". Ecole nationale supérieure des télécommunications, TELECOM Paris, 2003.
- [24] Fei Hu, Neeraj K.Sharma, "Security consideration in ad hoc sensor networks", Elsevier B.V, 26 November 2003.
- [25] C. Chong et S. Kumar, "Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges" Proceedings of IEEE, August 2003.
- [26] B. Sibbald, "Use computerized systems to cut adverse drug events". Canadian Medical Association Journal, June 2001.
- [27] G. Zhou, T. He, S. Krishnamurthy, et J. A. Stankovic, "Impact of Radio Irregularity on Wireless Sensor Networks". MobiSys 2004.
- [28] <http://www.alertsystems.org/>.
- [29] N. Noury, T. Herve, V. Rialle, G. Virone, E. Mercier, G. Morey, A. Moro, et T. Porcheron, "Monitoring behavior in home using a smart fall sensor". IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology, October 2000.
- [30] F. Nekoogar, F. Dowla, et A. Spiridon, "Self organization of wireless sensor networks using ultra-wideband radios". Atlanta, GA, United States, September 2004.
- [31] <http://french.bluetooth.com/> dernière consultation : le 28 janvier 2009.
- [32] <http://www.zigbee.org/> dernière consultation : le 28 janvier 2009.
- [33] Raluca Marin-Perianu, "Wireless Sensor Networks in Motion: Clustering Algorithms for Service Discovery and Provisioning", University of Twente, November 2008.
- [34] ACQUIRE N. Sadagopan, B. Krishnamachari, and A. Helmy. "The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks". Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications, Anchorage, Alaska, Mai 2003.
- [35] V. Handziski, A. Kopke, H. Karl, et A. Wolisz, "A common wireless sensor network architecture". Technische Universität Berlin, July 2003.

- [36] C.Y. Chong et S.P. Kumar, "Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges". Proceedings of the IEEE, vol. 91, n.8, 2003.
- [37] T. Zhao, W. D. Cai, et Y. J. Li, "A Sensor Network Topology Inference Algorithm, omputational Intelligence and Security". 2007 International Conference on. January 2008.
- [38] V. Handziski, J. Polastre, J. H. Hauer, C. Sharp, A. Wolisz, et D. Cullery, "Flexible Hardware Abstraction for Wireless Sensor Networks". In Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN '05), February 2005.
- [39] Jaap C. Haartsen, "The Bluetooth radio system". IEEE Personal Communications Magazine, February 2000.
- [40] Praxtel, Inc. ZigBee, "Technology for Wireless Sensor Networks". April 2006.
- [41] Proceeding of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2010 Vol II, IMECS 2010, Hong Kong, March 17-19, 2010
- [42] E. Souto, R. Gomes, D. Sadok and J. Kelner, "Sampling Energy Consumption in Wireless Sensor Networks". IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing -Vol 1 (SUTC'06), June 2006.
- [43] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, et M. B. Srivastava, "Energy-aware wireless microsensor networks". IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 19, No. 2, March 2002.
- [44] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, et H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks". In the Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences, Hawaii, January 2000.
- [45] M. Younis et T. Nadeem, "Energy efficient mac protocols for wireless sensor networks", Technical report, University of Maryland Baltimore County, USA, 2004.
- [46] Mohammad Ilyas, Imad Mahgoub, "Handbook Of Sensors Networks :Compact Wireless And Wired Sensing Systems" CRC press , 2005.
- [47] W. Ye, J. Heidemann, et D. Estrin "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks". In Proceedings of IEEE Infocom, pages 1567–76, New York, NY, 2002.
- [48] S. Ziane and A. Mellouk, "A swarm intelligent scheme for routing in mobile ad networks". Systems Communications, IEEE, Aug 2005.
- [49] Paolo Santi, "Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks". Hardcover, july 2005.
- [50] S. Kumar, D. Shepherd, et F. Zhao, "Collaborative signal and information processing in micro-sensor networks". IEEE Signal Processing Magazine, March 2002.
- [51] P. Misra and P. Enge, "Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance" Book Review, Ganga-Jamuna Press, Lincoln, Massachusetts, 2001.

- [52] W. Heinzelman, J. Kulik, et H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks" Proc. of the ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Seattle, WA, Aug. 17-19, 1999.
- [53] J. Kulik, W.R. Heinzelman, et H. Balakrishnan, "Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks," ACM Wireless Networks, 2002.
- [54] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, et D. Estrin, "Directed diffusion: a scalable and Robust communication paradigm for sensor networks," Proc. of the ACM/IEEE Conference on Computing and Networking, Boston, MA, Aug. 6-11, 2000.
- [55] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, et F. Silva, "Directed diffusion for wireless sensor networking," IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003.
- [56] L.T. Nguyen, X. Defago, R. Beuran, et Y. Shinoda, "An Energy-Efficient Routing Scheme for Mobile Wireless Sensor Networks" Proc. of the 5th IEEE Int'l Symposium on Wireless Communication Systems, Reykjavik, Iceland, October 21-24, 2008.
- [57] D. Braginsky et D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks" Proc Of the 1st ACM Workshop on Sensor Networks and Applications (RCSA), Atlanta, GA, USA, 2002.
- [58] A. Savvides, C. Han, et M.B. Strivastava, "Dynamic Fine-grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors," Proc. of the ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Rome, Italy, July 16-21, 2001.
- [59] B. Karp and H. Kung, "GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks" Proc. of the ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Boston, Massachusetts, USA, August 6-11, 2000.
- [60] I. Stojmenovic et X. Lin, "Power-Aware Localized Routing in Wireless Networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 12(11), 2001.
- [61] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, et R. Morris, "SPAN: an Energy-efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad-hoc Wireless Networks" Wireless Networks, Vol. 8(5), September 2002.
- [62] Y. Xu, J. Heidemann, et D. Estrin, "Geography-informed energy conservation for adhoc routing," Proc. of the ACM/IEEE Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Rome, Italy, July 16-21, 2001.
- [63] K. Sohrabi et J. Pottie, "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network," IEEE Personal Communications, Vol. 7(5), October 2000.
- [64] T. He, J.A. Stankovic, C. Lu, et T. Abdelzaher, "A Spatiotemporal Communication Protocol for Wireless Sensor Networks" IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 16(10), October 2005.

- [65] M. Ali et S. K. Ravula, "Real-time support and energy efficiency in wireless sensor networks". Technical report, IDE0805, January 2008.
- [66] S. Lindsey and C. Raghavendra, "PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems". Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, USA, March 2002.
- [67] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal, "TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks". International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, San Francisco, CA, April 2001.
- [68] N. V. Subramanian, "Survey on Energy-Aware Routing and Routing Protocols for Sensor Networks". University of North Carolina, Charlotte, 2004.
- [69] F. Ye et al., "A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Sensor Networks", 10th Int. Conf. Comp .Commun. and Networks, 2001.
- [70] A. Perrig, R. Szewczyk, J. D. Tygar, V. Wen, et D. E. Culler, "Spins : Security Protocols for Sensor Networks", Wirel. Netw. 8 , 2002.
- [71] YOUSEF Yaser, "Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil", UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE, 08/07/2010.