

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
 UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB BLIDA 1



FACULTÉ DES SCIENCES
 DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE

THÈSE DE MASTER

SPÉCIALITÉ : SYSTÈME INFORMATIQUE ET RÉSEAU



Etudes, implémentation et évaluation des protocoles MAC dans les
 réseaux de capteurs sans fils alimentés via les ondes
 électromagnétiques.

Encadré et dirigé par :

Mme HENNI MANSOUR Imene. (USDB)
 M. DJENOURI Djamel. (CERIST)

Présenté par :

CHABANE Roufaïda.
 EL-FANI Abdelwahab.

Les membres du jury :

M. OULD-KHAOUA Mohamed. (Président)
 Mme TOUBALINE Nesrine. (Examinatrice)

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que nous réservons ces lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à exprimer tout d'abord notre profonde reconnaissance à notre directrice de thèse Mm. Henni Mansour Imene, Doctorante en informatique, ainsi que notre encadrant M. Djenouri Djamel, Directeur de recherche, qui ont toujours su nous guider avec un grand professionnalisme. Leurs expertises, leurs rigueurs scientifiques et leurs conseils pertinents nous a permis d'avancer dans la bonne direction.

Nous adressons toute notre affection à nos chers parents qui ont su rester patients malgré notre éloignement. Leur confiance, leur tendresse et leur prière nous guident tous les jours.

Nous ne trouverons sans doute pas les mots pour remercier à leur juste valeur les personnes qui nous sont les plus chères : les membres de nos familles. Pour leur soutien sans faille, leur patience, et tout ce qu'ils ont pu nous apporter comme bonheur. Qu'ils sachent à travers ces quelques mots, l'expression de nos remerciements pour leur patience et leur soutien inestimable.

Enfin, à tous ceux que nous n'avons pas pu citer, auxquels nous réitérons nos sincères remerciements.

A vous tous, Merci!

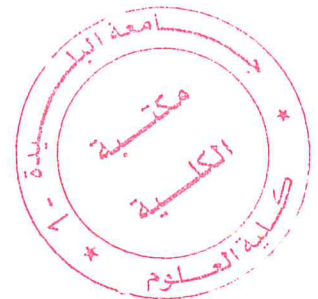
Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil posent de nombreux défis de conception. Ils doivent en particulier capter les informations provenant de l'environnement, traiter les données acquises puis les retransmettre. La durée de vie doit atteindre en général plusieurs dizaines d'années selon les applications, sans intervention extérieure, même si on considère des batteries rechargeables. Il est donc nécessaire d'optimiser la consommation énergétique à tous les niveaux.

La recharge périodique des nœuds de capteurs est un moyen prometteur de minimiser la maintenance et de prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil. La recharge peut utiliser l'énergie de l'environnement dans un processus communément appelé « récupération d'énergie », ou elle peut être effectuée via des impulsions de haute énergie provenant du coordinateur de réseau ou de la station de base. La première approche a l'avantage de ne pas dépendre de la disponibilité d'une source d'alimentation externe ayant une capacité suffisante, mais elle ne peut garantir que l'énergie nécessaire sera disponible dans l'environnement pour réapprovisionner la source d'énergie des nœuds en cas de besoin. De ce fait, et en raison de sa plus grande contrôlabilité, la recharge RF est de plus en plus utilisée ces dernières années.

La conception des protocoles MAC joue un rôle important dans la mise en place d'un réseau économe en énergie, car elle permet de contrôler directement les communications sans fil qui sont connues pour être les plus consommatrices d'énergie du nœud capteur.

Dans le cadre de notre recherche, nous allons implémenté ensuite simulé les protocoles MAC les plus pertinents utilisant la récupération de l'énergie radio fréquence, pour étudier leurs performances par rapport aux domaines d'applications.



Abstract

Wireless sensor networks pose many design challenges. In particular, they must capture the information coming from the environment, process the acquired data and retransmit them. The lifetime must generally reach several tens of years depending on the application, without external intervention, even if we consider rechargeable batteries. It is therefore necessary to optimize energy consumption at all levels.

Periodic recharging of sensor nodes is a promising way to minimize maintenance and extend the lifetime of wireless sensor networks. Charging can use the energy of the environment in a process commonly called "energy harvesting", or it can be performed via high energy pulses from the network coordinator or base station. The first approach has the advantage of not depending on the availability of an external power source with sufficient capacity, but it can not guarantee that the necessary energy will be available in the environment to replenish the source of energy of nodes in case of needs. Therefore, and because of its greater controllability, RF charging has been used more and more in recent years.

MAC protocol design plays an important role in establishing an energy-efficient network because it directly controls the wireless communications that are known to be the most energy-consuming nodes of the sensor node.

As part of our research, we will implement then simulate the most relevant MAC protocols using radio frequency energy harvesting, to study their performance with respect to application domains.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Introduction générale | 1 |
| 1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil. | 3 |
| Partie 1 : Les réseaux de capteurs sans fil. | 4 |
| Introduction | 4 |
| 1 Définition | 4 |
| 2 Architecture d'un nœud capteur | 5 |
| 3 Architecture de communication d'un RCSF | 5 |
| 4 Applicatiosn des RCSF | 6 |
| 5 Facteurs et contraintes des RCSF | 7 |
| 6 La pile protocolaire | 8 |
| Conclusion | 11 |
| Partie 2 : Les protocoles MAC dans les réseaux de capteurs sans fil. | 12 |
| Introduction | 12 |
| 1 Les caractéristiques d'un protocole MAC convenable aux RCSF | 12 |
| 2 La consommation d'énergie au niveau de la couche MAC dans les RCSF | 13 |
| 2.1 Modèle de consommation d'énergie | 14 |
| 2.2 Raisons de pertes d'énergie dans la couche MAC | 15 |
| 3 Les techniques d'accès au médium dans les RCSF | 16 |
| 4 Les mécanismes de conservation d'énergie | 18 |
| 5 Classification des protocoles MAC | 19 |
| Conclusion | 21 |
| 2 Le mécanisme de récupération d'énergie. | 22 |
| Partie 1 : La récupération d'énergie. | 23 |

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 23 |
| 1 Objectif de la récupération d'énergie dans RCSF | 23 |
| 2 La récupération d'énergie | 23 |
| 3 L'architecture de la récupération d'énergie | 24 |
| 4 Les sources de récupération d'énergie | 24 |
| Conclusion | 26 |
| Partie 2 : La récupération d'énergie radiofréquence. | 27 |
| Introduction | 27 |
| 1 La récupération d'énergie RF | 27 |
| 2 Architecture d'un RF-EHN | 28 |
| 3 Modèles de propagation d'énergie RF | 30 |
| 4 Les sources de récupération d'énergie RF | 31 |
| 5 Applications existantes de la récupération d'énergie | 32 |
| 6 Conception de l'architecture du récepteur | 32 |
| Conclusion | 35 |
| 3 Etat de l'art sur les protocoles MAC basé sur des fréquences radio. | 36 |
| Introduction | 36 |
| 1 EA-MAC (Energy Adaptive MAC) | 37 |
| 2 RF-MAC (Radio Frequency MAC) | 38 |
| 2.1 Le temps de chargement | 40 |
| 2.2 Aperçu du protocole RF-MAC | 40 |
| 3 Polling MAC | 41 |
| 4 Zoning-MAC protocol | 44 |
| 5 RF Multichannel-MAC protocol | 45 |
| Conclusion | 48 |
| 4 Analyse des résultats des simulations. | 49 |
| Introduction | 49 |
| 1 Paramètres de simulations | 50 |
| 2 Scénario 1 (12 nœuds) | 51 |

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Polling-MAC | 52 |
| 2 | EA-MAC | 53 |
| 3 | RF Multichannel-MAC | 54 |
| 4 | Polling-MAC, EA-MAC et RF Multichannel-MAC | 55 |
| 3 | Scénario 2 (06 nœuds) | 56 |
| 1 | Polling-MAC | 56 |
| 2 | EA-MAC | 57 |
| 3 | RF Multichannel-MAC | 58 |
| 4 | Polling-MAC, EA-MAC, RF Multichannel-MAC | 59 |
| 4 | Qualité de Service | 59 |
| | Conclusion | 60 |
| | Conclusion générale | 61 |
| | Bibliographie | 67 |
| | Glossaire | 68 |

Table des figures

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Architecture d'un nœud capteur. | 5 |
| 1.2 | Architecture de communication d'un RCSF. | 6 |
| 1.3 | La pile protocolaire. | 8 |
| 1.4 | Energie consommée par les sous-systèmes d'un nœud de capteur. | 13 |
| 1.5 | Modèle de consommation d'énergie. | 14 |
| 1.6 | La surécoute dans une transmission. | 15 |
| 1.7 | Les trames de TDMA. | 17 |
| | | |
| 2.1 | Une architecture générale d'un RF-EHN. | 28 |
| 2.2 | Une architecture générale d'un dispositif de récupération d'énergie RF. | 29 |
| 2.3 | Architecture de récepteur séparé. | 33 |
| 2.4 | Architecture de la commutation temporelle. | 33 |
| 2.5 | Architecture de diviseur de puissance. | 34 |
| 2.6 | Architecture du récepteur Intégrée. | 34 |
| | | |
| 3.1 | le diagramme de transition d'état pour EA-MAC. | 38 |
| 3.2 | Exemple d'architecture de réseau avec des transmetteurs d'énergie (x, y, z) et des capteurs de collecte RF (S1, S2). | 39 |
| 3.3 | L'effet de différence de phase sur la puissance du signal reçu à 915 MHz. | 40 |
| 3.4 | La topologie du réseau. | 41 |
| 3.5 | Les périodes de recharge et de dépense d'énergie. | 43 |
| 3.6 | Le réseau avec décomposition en zones et secteurs. | 44 |
| 3.7 | L'utilisation du monocanal et du multi-canal. | 46 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1.a | La moyenne de consommation d'énergie du protocole Polling-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic dense. | 52 |
| 4.2.b | La moyenne de consommation d'énergie du protocole Polling-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic léger. | 52 |
| 4.2.a | La moyenne de consommation d'énergie du protocole EA-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic dense. | 53 |
| 4.2.b | La moyenne de consommation d'énergie du protocole EA-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic léger. | 53 |
| 4.3.a | La moyenne de consommation d'énergie du protocole RF Multichannel-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic dense. | 54 |
| 4.3.b | La moyenne de consommation d'énergie du protocole RF Multichannel-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic léger. | 54 |
| 4.4 | La moyenne de consommation d'énergie des 03 protocoles avec 12 nœuds (génération de paquets chaque 50 slot de temps). | 55 |
| 4.5 | La moyenne de consommation d'énergie des 03 protocoles avec 12 nœuds (génération de paquets chaque 15 slot de temps). | 55 |
| 4.6.a | La moyenne de consommation d'énergie du protocole Polling-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic dense. | 56 |
| 4.6.b | La moyenne de consommation d'énergie du protocole Polling-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic léger. | 56 |
| 4.7.a | La moyenne de consommation d'énergie du protocole EA-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic dense. | 57 |
| 4.7.b | La moyenne de consommation d'énergie du protocole EA-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic léger. | 57 |
| 4.8.a | La moyenne de consommation d'énergie du protocole RF Multichannel-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic léger. | 58 |
| 4.8.b | La moyenne de consommation d'énergie du protocole RF Multichannel-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic dense. | 58 |
| 4.9 | La moyenne de consommation d'énergie des 03 protocoles avec 06 nœuds (génération de paquets chaque 15 slot de temps). | 59 |

| | |
|---|----|
| 4.10 La moyenne de consommation d'énergie des 03 protocoles avec 06 nœuds (géné- ration de paquets chaque 50 slot de temps). | 59 |
| 4.11 Qualité de service dans le cadre d'un trafic léger. | 59 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Description des unités de consommation d'énergie au niveau du cycle d'interrogation. | 43 |
| 3.2 | Tableau résumant les protocoles MAC étudiés. | 47 |
| 4.1 | Les paramètres de simulation. | 50 |

Liste des abréviations

RCSF : Réseau de Capteurs Sans Fil.

ADC : Analog to Digital Converters.

GPS : Global Position System.

WBSN : Wireless Body Sensor Network.

MAC : Medium Access Control.

FEC : Forward Error Correction.

UDP : User Datagram Protocol.

TCP : Transmission Control Protocol.

SMP : Sensor Management Protocol.

SQDDP : Sensor Query and Data Dissemination Protocol.

TDMA : Time Division Multiple Access.

FDMA : Frequency Division Multiple Access.

CDMA : Code Division Multiple Access.

CSMA/CA : Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.

BSS : Basic Service Set.

NAV : Network Allocation Vector.

TTL : Time To Live.

B-MAC : Berkeley-Medium Access Control.

S-MAC : Sensor-Medium Access Control.

Z-MAC : Zebra-Medium Access Control.

MC-LMAC : Multi-Channel Lightweight Medium Access Control.

RF : Radio Fréquence.

RF-EHN : Radio Frequency-Energy Harvesting Network.

QoS : Quality of Service.

FCC : Federal Communications Commission.

GSM : Global System for Mobile Communications.

RFID : Radio Frequency Identification.

CFE : Cleared For Energy.

ARQ : Automatic Repeat Request.

TIC : Technologie de l'Information et de Communication.

Introduction générale

La limitation de l'énergie est l'un des plus grands défis qui empêchent le déploiement à grande échelle des réseaux de capteurs sans fil, qui sera une nécessité pour des applications concrètes dans un avenir proche, comme les villes intelligentes et les réseaux intelligents. La surveillance de l'environnement, la gestion du trafic routier, la santé, etc., notamment dans le contexte émergent de l'internet des objets (IoT).

Avec un tel déploiement à grande échelle, l'utilisation de piles jetables aura des conséquences dramatiques sur l'environnement. En outre, la plupart des applications devraient être déployées dans un environnement non intentionnel, parfois hostile, où le remplacement des batteries serait non seulement peu pratique, mais irréalisable. La récupération d'énergie apparaît comme la meilleure solution pour résoudre ce problème. Des ressources environnementales telles que l'énergie solaire, l'énergie électromagnétique, etc., peuvent être utilisées à cette fin. La récupération d'énergie exploite l'énergie ambiante et la convertit en électricité utilisable pour alimenter les nœuds de capteurs. Cela contribuera à la préservation de l'environnement à l'avenir, où les énergies vertes joueront un rôle clé dans la protection de l'environnement.

Les protocoles et architectures existants - qui supposent l'utilisation de batteries portables et limitées - ont été révisés et reconstruits sur un modèle énergétique exploitant cette nouvelle fonctionnalité. Le but de ce mémoire est d'abord d'étudier les techniques existantes de récupération d'énergie. Ensuite, implémenté et simulé les protocoles les plus pertinents dans la littérature afin de les comparer avec des travaux proposés au CERISIT.

Notre mémoire dévoile la structure suivante :

- **Le premier chapitre** consacré aux généralités sur les RCSF, nous allons présenter les éléments fondamentaux qui composent un nœud capteur. Ensuite, nous donnons plusieurs domaines d'applications des RCSF, puis, on procède aux caractéristiques d'un protocole MAC convenable aux RCSF, nous détaillons après un modèle de consommation d'énergie et on termine par une classification des protocoles MAC dans les RCSF.

- **Le deuxième chapitre** intitulé état de l'art sur la récupération d'énergie, présente en premier une généralité sur la récupération d'énergie en citons quelques sources de récupération d'énergie, ensuite nous détaillons la récupération d'énergie RF tout en présentons l'architecture d'un RF-EHN, un modèle de propagation d'énergie RF et finalement nous donnons quelques sources de récupération d'énergie RF.
- **Le troisième chapitre** présente l'état de l'art sur les protocoles MAC les plus cités en littérature basé sur la récupération des fréquences radio EA-MAC, RF-MAC, Polling-MAC, Zoning-MAC et RF Multichannel-MAC (proposé par l'équipe de CERIST) ensuite nous avons présenter un tableau qui résume les protocoles MAC étudiés.
- **Le quatrième chapitre** dans ce chapitre nous entamons la simulation nous présentons les résultats de simulation des trois protocoles MAC dans MATLAB R2016a tout en variant dans la taille du réseau dans un trafic dense / léger et enfin les résultats de simulation de la qualité de service.

Nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil.

Introduction

Ce chapitre présente l'état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Il sera donc composé de deux parties : Une généralité sur les RCSF, Les protocoles MAC dans les RCSF. La première présente une définition sur les RCSF, l'architecture d'un noeud capteur, l'architecture de communication d'un RCSF, on citera quelques applications des RCSF facteurs et contraintes des RCSF, et en dernier on détaillera la pile protocolaire. Dans la seconde on présentera les caractéristiques d'un protocole MAC convenable aux RCSF, un modèle de consommation d'énergie au niveau de la couche MAC, les techniques d'accès au médium dans les RCSF, et finalement une classification des protocoles MAC.

Partie 1 : Réseaux de capteurs sans fil

Introduction

Les récentes avancées dans le domaine de technologie sans fil et électronique ont permis le développement à faible coût de minuscules capteurs consommant peu d'énergie (*solution low-cost and low-power*). Un capteur est un petit appareil autonome capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement immédiat. Il permet d'observer et de contrôler de nombreux phénomènes physiques tels que la température, la pression, la luminosité, etc., ce qui est essentiel pour de nombreuses applications industrielles et scientifiques [1]. Dans cette section nous allons présenter les réseaux de capteurs sans fils : leurs architectures de communication et leurs applications. Nous allons discuter également les principaux facteurs et contraintes qui influencent la conception des réseaux de capteurs sans fils, en derniers nous allons détailler la pile protocole.

1 Définition

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variants de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil. [2]

Ces capteurs doivent être très solides et de plus, ils doivent aussi pouvoir survivre dans les conditions les plus extrêmes dictées par leur environnement d'utilisation (feu ou eau par exemple), afin de résister aux déploiements.

En plus des contraintes environnementales, une contrainte très importante est l'économie de batterie. En effet, un réseau de capteurs ne peut survivre si la perte de nœuds est trop importante car ceci engendre des pertes de communication dues à une trop grande distance entre les capteurs. Donc il est très important que les batteries durent le plus longtemps possible étant donné que dans la plupart des applications ils sont placés aléatoirement (impossible de retourner changer les batteries).

[3]

2 Architecture d'un nœud capteur

Un nœud capteur est composé de quatre unités principales, qui sont présentées dans la figure 1.1 [4][5]

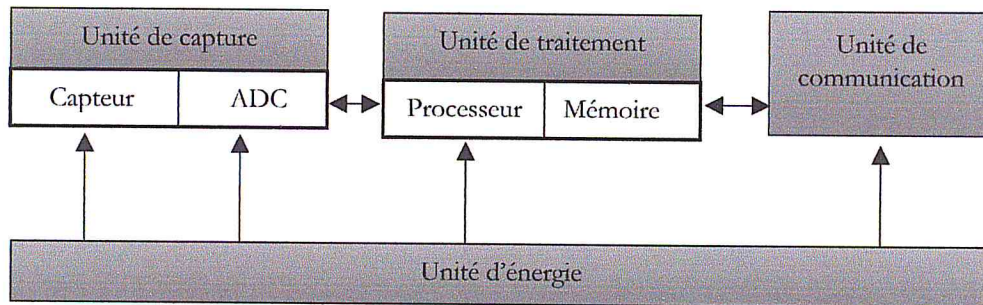


FIGURE 1.1: Architecture d'un nœud capteur.
[4][5]

Unité de capture (*Sensing unit*) est composée de deux sous unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (*Analog to Digital Converters*). Les données captées par l'unité de capture seront transmises à l'**unité de traitement (*Processing unit*)** qui sont communiquées au processeur où elles sont stockées dans la mémoire. Après cela l'**unité de communication (*Transceiver unit*)** permet une communication entre les différents nœuds du réseau à travers un module radio (émetteur/récepteur). Afin de garantir le fonctionnement de tous les composants de nœud capteur, l'**unité d'énergie (*Power unit*)** fournit la tension d'alimentation pour l'ensemble du nœud, elle n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable.

-Il peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation GPS (*Global Position System*).

3 Architecture de communication d'un RCSF

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture. Chacun de ces nœuds a la possibilité de collecter les données et de les router vers une ou plusieurs stations de base (*sink nodes*). Ce dernier est un point de collecte de données capturées, ensuite il transmet ces données par Internet ou par satellite à l'ordinateur central « Gestionnaire de tâches » pour analyser ces données et prendre des décisions[6]. Cette architecture est illustrée dans la figure 1.2

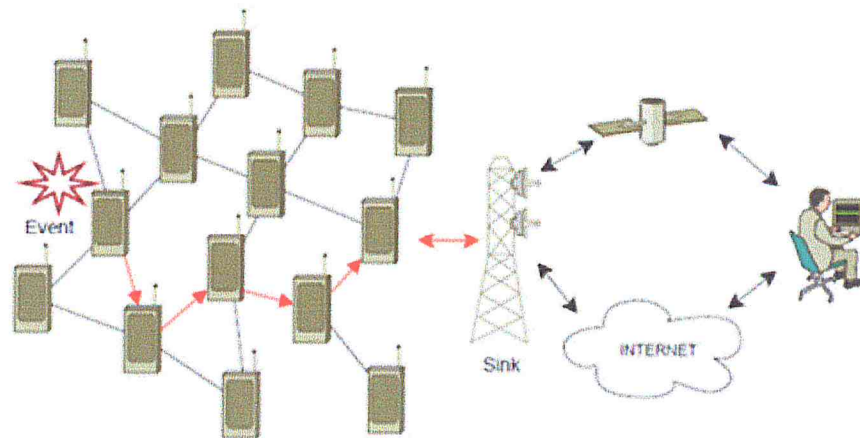


FIGURE 1.2: Architecture de communication d'un RCSF.
[4]

4 Applications des RCSF

Les RCSF peuvent avoir plusieurs applications surtout dans le domaine de l'internet des objets, parmi elles, nous citons :

Parking intelligent, cette application implique le déploiement de capteurs magnétométriques dans le sol, sous les emplacements de stationnement. Ces nœuds capteurs détectent la présence d'un véhicule et transmettent les changements de disponibilité des emplacements à la passerelle. Toutes les données sont le plus souvent stockées dans le module avec la fonction *Data Logger* (voir l'annexe) puis consultées par l'opérateur, soit via son terminal mobile, soit depuis le centre de gestion.
[7]

Gestion d'eau intelligente, cette application peut aider à surveiller les conditions environnementales et la qualité de l'eau, en relevant les bonnes données, pour ensuite conduire à une meilleure utilisation des ressources. Les nœuds de capteurs sont utilisés pour mesurer les paramètres de l'eau tels que le pH, la température ou la conductivité. Le système repère également les éventuelles défaillances des engins et autres pompes à eau. [8]

Bâtiment intelligent, le capteur de mouvement peut être activé à distance et repérer une présence ou non avant d'allumer ou éteindre les lumières. Le système contrôle l'environnement des salles de réunion. La température de la pièce est captée par le module puis réglée via une télécommande afin de réduire la consommation d'énergie. [8]

Agriculture intelligente, cette application a permis l'installation d'un système d'irrigation automatisé avec un contrôle des données en temps réel, capable d'enregistrer et de s'adapter aux conditions environnementales à l'intérieur même de la serre. Les données sont représentées sous forme graphique afin d'étudier les effets de saisonnalité et ainsi prendre les bonnes mesures quand les valeurs atteignent des niveaux non conformes. [9]

Domaine de la santé, un réseau de capteurs de corps sans fil (WBSN) définit un système autonome qui est utilisé pour surveiller les activités de la vie quotidienne d'une personne. Il se compose de capteurs intelligents qui n'entravent pas les activités de la vie quotidienne et sont utiles pour détecter les maladies chroniques comme les crises cardiaques, l'asthme, le diabète, etc. et pour avertir les patients en cas d'urgence. [9]

La ville intelligente, apportent une solution technique à l'automatisation des tâches de gérance, en permettant par exemple d'adapter l'éclairage aux conditions d'environnement, Suivre l'affluence des véhicules et des piétons pour optimiser la circulation, Contrôler les accès aux zones réglementées et détections de personnes non autorisées, Surveiller les vibrations et l'usure des bâtiments, des ponts et des monuments historiques, on peut même recevoir des messages d'alerte et déviations liés aux aléas de la route, comme les embouteillages ou accidents.[8]

5 Facteurs et contraintes des RCSF

La conception et la réalisation des RCSF sont influencées par plusieurs paramètres, qui servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF. La durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures à plusieurs années. Les nœuds capteurs ont une capacité de traitement et de mémoire limitée. Les capteurs opèrent à bas débit pour minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds.

Le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœud engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que les stations de base soient équipées de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues. Les données produites par les nœuds capteurs voisins sont très corrélées spatialement et temporellement, ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes, l'une des techniques utilisées pour réduire la transmission d'information redondantes est l'agrégation des données [10], cette technique est connue aussi sous le nom de fusion de données. Les capteurs doivent pouvoir

fonctionner sans surveillance dans des régions géographiquement éloignées ou inaccessible. [11]

6 La pile protocolaire

Le but d'un système en couches est de séparer le problème en différentes parties (les couches) selon leur niveau d'abstraction. Chaque couche du modèle communique avec une couche adjacente (celle du dessus ou celle du dessous). Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur. [12]

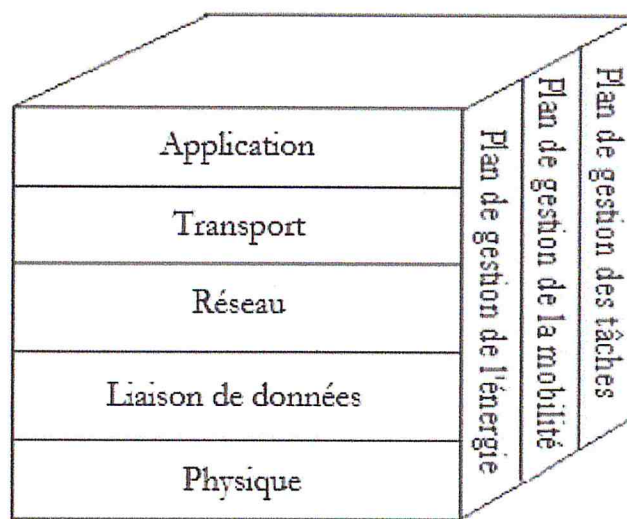


FIGURE 1.3: La pile protocolaire.
[13]

• La couche physique

Elle est responsable de la sélection de fréquence, la génération de la fréquence porteuse, la détection du signal, la modulation / démodulation et le cryptage / décryptage des informations.

La consommation d'énergie au niveau de la couche physique peut être affectée par l'environnement de l'application, le choix du type de la modulation ou la bande de fréquence utilisée.

Il est avantageux en matière d'économie d'énergie que le concepteur de la couche physique choisisse une transmission à multi-sauts plutôt qu'une transmission directe qui nécessite une puissance de transmission très élevée. [4]

• La couche liaison de données

Elle est responsable de la détection des trames de données, le contrôle d'accès au support (MAC) et le contrôle d'erreurs. Elle maintient aussi la fiabilité des connections point à point ou multipoints dans les RCSF.

La couche liaison de données contient deux sous-couches qui sont :

- **La sous-couche MAC** : Dans un RCSF, la couche MAC doit accomplir deux principales tâches qui sont celles de :

- établir des liaisons de communication entre les nœuds capteurs pour effectuer le transfert des données et permettre au réseau la capacité de s'auto-organiser.

- décider du moment et de la manière dont les nœuds capteurs peuvent accéder au canal avec un minimum de perte d'énergie [4].

- **La sous-couche de contrôle d'erreurs** : La technique de contrôle d'erreurs la plus utilisée dans les réseaux RCSF est le « *Forward error correction* » (FEC) ; Cette technique comporte de simples mécanismes de codage et de décodage (codes de contrôle d'erreurs simples). [4]

• La couche réseau

La couche réseau gère les échanges (et éventuellement les connexions) au travers du RCSF. Elle gère entre autres l'adressage et l'acheminement des données.

Les applications des RCSF requièrent le plus souvent des protocoles de routage à multi-sauts entre le nœud émetteur, le ou les nœuds relais et la station de base.

Les protocoles de routage traditionnels des réseaux ad hoc ne peuvent pas être utilisés dans les réseaux RCSF puisqu'ils ne satisfont pas les critères de conservation d'énergie et de scalabilité. [14]

Le type d'adressage le plus utilisé dans les RCSF est l'adressage géographique, c'est-à-dire que chaque nœud capteur est identifié dans le réseau par sa localisation. D'ailleurs, l'adressage géographique est employé surtout dans les applications de monitoring (« *environmental monitoring* » ...). [15]

• La couche transport

Le rôle de cette couche intervient essentiellement lorsqu'on va accéder à partir de notre RCSF vers un autre RCSF ou vers Internet.

Le protocole de transport utilisé entre le nœud émetteur et la station de base peut être UDP. Il

importe de mentionner que l'utilisation du protocole TCP est impossible vu la taille limitée des mémoires des nœuds capteurs qui ne leur permet pas d'enregistrer de grandes quantités d'informations pour la gestion des communications (mécanismes de fenêtres).

Les communications entre l'utilisateur et la station de base peuvent être gérées par TCP ou UDP via Internet ou satellite.

- **La couche application**

Il existe plusieurs protocoles applicatifs qui ont été proposés. Parmi lesquels, on peut citer le SMP (*Sensor Management Protocol*) qui permet à l'utilisateur d'exécuter des tâches administratives telles que la configuration du RCSF, la mise en marche/fermeture des nœuds, la synchronisation entre les nœuds, le déplacement des nœuds capteurs. . .

En plus du protocole SMP, on trouve SQDDP (*Sensor Query and Data Dissemination Protocol*) qui permet à l'utilisateur à travers des interfaces d'interroger le réseau en se basant non pas sur un système d'adressage particulier (interroger un nœud bien particulier) comme tel est le cas des réseaux sans fil classiques mais plutôt sur la localisation des nœuds. [4]

Exemple de requête : « quelles sont les localisations des nœuds qui captent des températures supérieures à 70 degrés »

- **Le plan de gestion d'énergie**

Il gère la manière dont le nœud utilise son énergie. Par exemple, si le nœud capteur est faible en énergie, il pourra informer ses nœuds voisins par multicast qu'il ne pourra pas participer dans le routage des paquets. [4]

- **Le plan de gestion de la mobilité**

Il détecte les mouvements des nœuds et indique leurs placements. De cette manière, chaque nœud peut connaître les nœuds qui lui sont voisins (il pourra alors balancer ses tâches vers un autre nœud au cas où il manque d'énergie). Il doit aussi maintenir à n'importe quel instant la route séparant le nœud mobile de la station de base. [4]

- **Le plan de gestion des tâches**

Il assure un ordonnancement des tâches de capture dans une région bien déterminée tout en évitant la redondance des tâches de capture à un même instant, et ceci dans le but d'économiser de l'énergie sur le réseau. [4]

L'intérêt de ces trois plans réside dans le fait qu'ils assurent une gestion optimale de la consom-

mation d'énergie, de la mobilité et des tâches au niveau de chaque nœud capteur.

Conclusion

En résumé, Cette partie nous a permis de voir le fonctionnement général d'un nœud capteur sans fil. Ce dernier est composé de différents modules matériels (unité de traitement, unité de captage, unité de transmission et l'énergie). Un nœud capteur sans fil peut être aussi représenté par des couches protocolaires adjacentes. Chaque couche a ses propres rôles et collabore avec ses couches adjacentes. Ainsi, l'optimisation que l'on veut apporter au niveau de chaque couche a une influence très importante sur le choix des mécanismes et des protocoles que l'on veut implémenter dans le nœud capteur. Ce choix doit prendre en compte la consommation d'énergie et dépend également du type de topologie du réseau et de l'application du nœud capteur sans fil.

- **Le temps d'attente ou latence** : C'est le délai entre l'instant d'émission d'un message et l'instant de sa réception avec succès. L'importance de cette caractéristique est dépendante du type d'application.

2 La consommation d'énergie au niveau de la couche MAC dans les RCSF

L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes : la capture, le traitement et la communication de données [17]. La figure 1.4 représente la consommation d'énergie au niveau de chaque opération. [18]

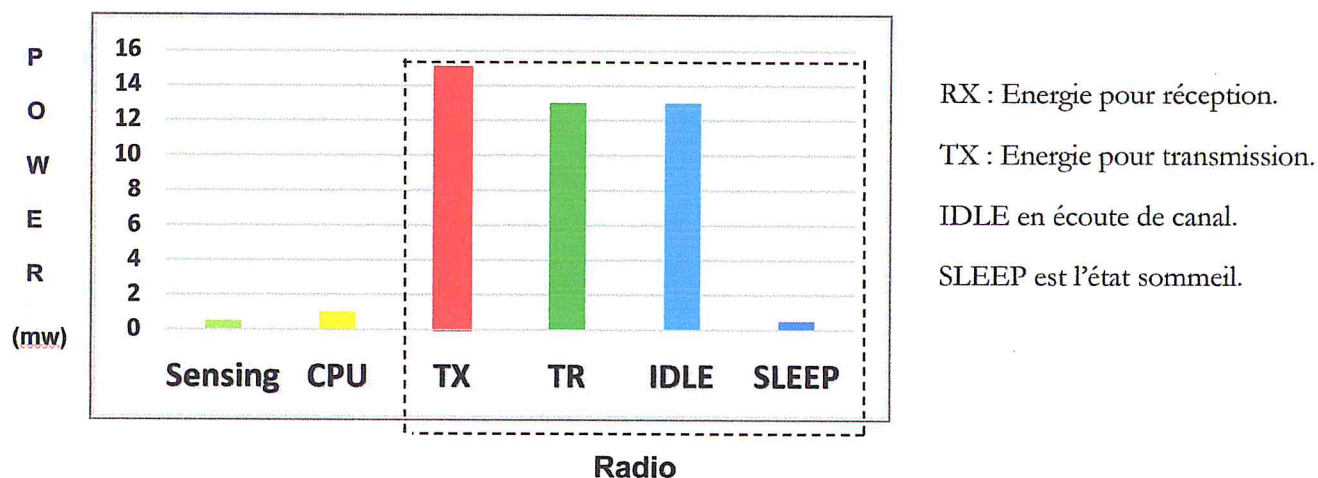


FIGURE 1.4: Energie consommée par les sous-systèmes d'un nœud de capteur. [18]

• Energie de capture

L'énergie de capture est dissipée pour accomplir les tâches suivantes : échantillonnage, traitement de signal, conversion analogique/numérique et activation de la sonde de la capture. En général, l'énergie de capture représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommé par un nœud.

• Energie de traitement

L'énergie de traitement se divise en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale

commutée au niveau logiciel (en exécutant un 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.

- **Energie de communication**

L'énergie de communication se décline en deux parties : l'énergie de réception et l'énergie de l'émission. 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 dans la figure 1.4 l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur.

2.1 Modèle de consommation d'énergie

Une panoplie de recherche ont été effectuées dont les auteurs dans [17] qui ont proposer un modèle radio de consommation d'énergie (voir figure 1.5). Ainsi, les énergies nécessaires pour émettre ETx et recevoir ERx des messages sont données par :

- Pour émettre un message de s bits vers un récepteur loin de d mètres, l'émetteur consomme :

$$ETx(s, d) = ETx\ elec(s) + ETx\ amp(s, d)$$

$$ETx(s, d) = (Eelec * s) + (Eamp * s * d^2)$$

- Pour recevoir un message de s bits, le récepteur consomme :

$$ERx(s) = ERx\ elec(s)$$

$$ERx(s) = Eelec * s$$

$Eelec$ et $Eamp$ représentent respectivement l'énergie de transmission électronique et d'amplification (voir figure 1.5)

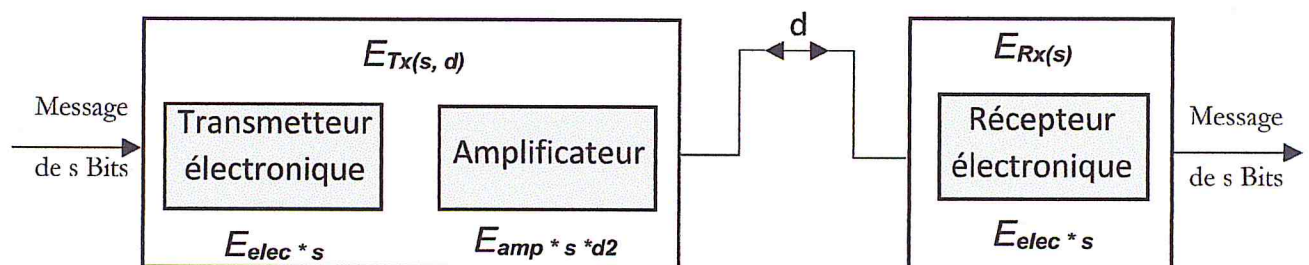


FIGURE 1.5: Modèle de consommation d'énergie.

[17]

2.2 Raisons de pertes d'énergie dans la couche MAC

Dans cette branche on essayera d'analyser les raisons de perte d'énergie au niveau de la couche MAC dans les RCSF. [19]

a. La retransmission

Les nœuds capteurs possèdent en général une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. Par ailleurs, la transmission simultanée des données provenant de plusieurs capteurs peut produire des collisions et ainsi une perte de l'information transmise. La retransmission des paquets perdus peut engendrer une perte significative de l'énergie. [20]

b. L'écoute active

L'écoute active (*idle listening*) du canal pour une éventuelle réception de paquet qui ne sera pas reçu peut engendrer une perte importante de la capacité des nœuds en énergie. Pour éviter ce problème, il faut basculer les nœuds dans le mode sommeil le plus longtemps possible. [20]

c. La surecoute

Le phénomène de surecoute (*overhearing*) se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés (voir figure 1.6). La surecoute conduit à une perte d'énergie additionnelle à cause de l'implication des autres capteurs dans la réception des données. [20]

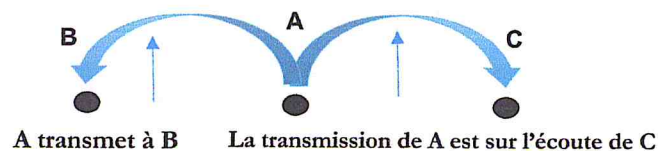


FIGURE 1.6: La surecoute dans une transmission.
[20]

d. La surcharge

Plusieurs protocoles de la couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle (*overhead*) pour assurer différentes fonctionnalités : signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions. Tous ces messages nécessitent une énergie additionnelle. [20]

e. La surémission

Le phénomène de surémission (*overemitting*) se produit quand un nœud capteur envoie les données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. En effet, les messages envoyés sont considérés inutiles et consomment une énergie additionnelle. [20]

f. La 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 élevée ni trop faible. En effet, si elle est petite, le nombre de paquets de contrôle (accusé de réception) généré augmente l'*overhead*. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour des paquets de grande taille. [20]

g. Routage des données

Le routage dans les réseaux de capteurs est 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 de l'énergie soit pour transmettre ces données ou pour relayer les données des autres nœuds. Dans ce contexte, une mauvaise politique de routage peut avoir des conséquences graves sur la durée de vie du réseau. [20]

h. Modèle de propagation radio

Le modèle de propagation représente une estimation de la puissance moyenne reçue du signal radio à une distance donnée d'un émetteur. La propagation du signal radio est généralement soumise à différents phénomènes : la réflexion, la diffraction et la dispersion par divers objets. Généralement, la puissance du signal reçue est de l'ordre de $1/d^n$, où d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, n un exposant de perte d'un chemin (Exemple : $n=2$ dans le vide, de 4 à 6 dans un immeuble). [20]

3 Les techniques d'accès au médium dans les RSCF

Un défi important dans les réseaux sans fil est la gestion des collisions dues à un transfert de données simultanément entre deux nœuds sur le même support. Les protocoles MAC ont été développés essentiellement pour essayer d'éviter ce genre de collisions en aidant les nœuds à décider quand et comment ils peuvent accéder au support. Dans cette section, nous allons essayer de dégager les diverses techniques d'accès au médium dans les réseaux sans fil.

a. L'accès multiple par répartition temporelle (TDMA)

Dans les systèmes TDMA (*Time Division Multiple Access*), le temps est divisé en slots regroupés dans une trame (figure 1.7) qui se répète de manière cyclique [9][21]. Chaque nœud appartenant au réseau utilisera son propre slot pour l'envoi et la réception des données. TDMA évite les collisions

et utilise une bonne consommation d'énergie par contre le problème de latence apparaît. Imaginons le cas où il y a N nœuds donc N slots et chaque slot a un temps T_s . La durée d'une trame est alors de : $T_f = N * T_s$

Le récepteur doit identifier chaque paquet dans un slot afin de lire les informations qui lui sont destinées. L'approche TDMA est basée autour d'un élément central appelé point d'accès qui permet d'associer à chaque nœud un slot. Lorsqu'un slot est attribué à un nœud, les autres nœuds peuvent éteindre leurs radios.

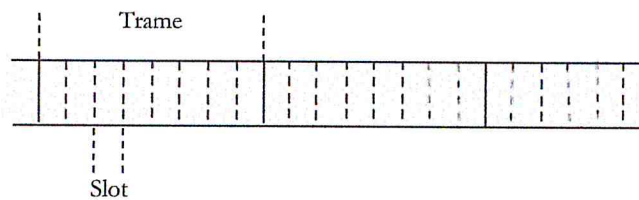


FIGURE 1.7: Les trames de TDMA.

b. L'accès multiple par répartition fréquentielle (FDMA)

Dans l'approche FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) [21], la bande passante est divisée en canaux et chaque nœud peut communiquer en utilisant son propre canal. Ceci permet aux nœuds de communiquer simultanément. Le problème des collisions est minimisé puisque les nœuds communiquent à travers des canaux de radio séparés. Cependant, une faible bande passante est disponible et ainsi la consommation d'énergie augmentera. Contrairement à TDMA, FDMA élimine le problème de latence. Pour implémenter FDMA dans les réseaux de capteurs, les nœuds doivent être équipés d'un système de radio complexe qui sera capable de recevoir des signaux provenant de plusieurs canaux, c'est pour cela que l'utilisation de FDMA dans les réseaux de capteurs est limitée.

c. L'accès multiple par répartition de codes (CDMA)

La technique CDMA (*Code Division Multiple Access*) [21] autorise l'allocation de la totalité de la bande de fréquences. Tous les nœuds communiquent simultanément. Pour ce faire, un code spécifique est octroyé à chaque nœud qui l'utilisera pour transmettre l'information qu'il désire communiquer en format binaire d'une manière orthogonale aux autres communications. Toutefois, un problème d'auto interférence entre en jeu qui s'intensifie au fur et à mesure que le nombre de communications simultanées augmente. Dans un réseau multi saut, un nœud qui relaye les données doit disposer d'une grande capacité mémoire pour stocker les codes de la plupart ou de la

totalité des noeuds, ce qui peut dépasser la capacité mémoire d'un capteur.

d. L'accès multiple avec écoute de la porteuse/Évitement de collision (CSMA/CA)

Contrairement aux techniques TDMA, FDMA et CDMA qui sont des techniques « programmées d'avance » [22] et dans lesquelles les noeuds sont assignés à des canaux partitionnés (temps, fréquence, code) pour éviter les collisions, CSMA/CA constitue une technique aléatoire dans laquelle chaque nœud doit rester à l'écoute du médium avant de transmettre ses données. En effet, les terminaux d'un même BSS (groupe de terminaux munis d'une carte d'interface réseau 802.11 et interconnectés entre eux) peuvent écouter l'activité de toutes les stations qui s'y trouvent. Lorsqu'une station envoie une trame, les autres stations l'entendent et, pour éviter les collisions, mettent à jour un « *Timer* », appelé NAV (*Network Allocation Vector*) permettant de retarder toutes les transmissions prévues. Le NAV est calculé par rapport à l'information située dans le champ durée de vie, ou TTL (*Time To Live*) contenu dans les trames qui ont été envoyées. Les autres stations n'ont la capacité de transmettre qu'après la fin du NAV. [23]

L'utilisation de CSMA/CA oblige les nœuds d'être éveillés pour l'écoute du médium ce qui accroît leur consommation d'énergie. En outre, si on utilise cette technique dans un réseau à haute densité de nœuds comme les RCSF, on peut accroître le risque de collisions dans ce réseau, provoquer la perte des données transmises et engendrer d'avantage de consommation d'énergie lors de la retransmission.

4 Les mécanismes de conservation d'énergie

Une panoplie de recherche a été proposée pour les mécanismes de conservation d'énergie nous citons parmi les deux mécanismes les plus connus :

a. Les séquences d'états périodiques actif et endormi

La communication radio gérée par la couche MAC est la source la plus consommatrice d'énergie, due à l'écoute passive du canal en l'absence de toute transmission ou réception. L'idée est d'éteindre la radio en cet état, afin de conserver l'énergie, ce qui fait passer les nœuds à un état endormi périodique. Chaque nœud s'endort pendant un intervalle de temps puis se réveille et se met à l'écoute s'il y a un autre nœud voulant initier une communication avec lui ou s'il veut lui-même initier une communication. Cette séquence d'états périodiques est connue dans la littérature sous le nom « *Duty Cycle* ». Durant l'état endormi, le nœud éteint son interface radio et déclenche un

temporisateur pour son réveil plus tard. La durée des états « Actif » et « endormi » varie suivant la nature de l'application. [24]

b. La radio de réveil (*Wake-up Radio*)

Les protocoles MAC utilisant la radio de réveil sont préférés de nos jours, surtout avec les avances constantes dans les circuits et la technologie matérielle. Utilisant un radio de réveil séparée, le cycle de service est complètement éliminé et ainsi, tous les inconvénients et les compromis présentés sont évités. Les nœuds passent tout le temps en mode veille tandis que la radio de réveil sert de petit œil à surveiller la chaîne. Si un nœud veut transmettre un paquet à son voisin, il commence simplement par envoyer un petit message de réveil (*Short Wake-up Message*). Aussi tôt que la radio de réveil du récepteur détecte le signal de réveil, il réveille immédiatement la radio principale qui va effectuer les tâches requises, puis se rendormir jusqu'à un prochain événement se produit, ce qui réduit la consommation d'énergie. [25]

5 Classification des protocoles MAC

Dans cette section nous fournissons un aperçu des protocoles MAC dans les RCSF du point de vue de l'efficacité énergétique. Nous divisons les protocoles MAC en quatre branches : asynchrone, synchrone, frame-slotted et multicanal (*Multi-Channel*).

a. Les protocoles MAC asynchrones :

Chaque nœud choisit son programme actif de manière autonome sans connaître les horaires de ces nœuds voisins, aucune synchronisation entre les nœuds n'est requise. Parmi les protocoles MAC asynchrones les plus connus nous citons **B-MAC** (*Berkeley MAC*). [26]

Dans B-MAC, les récepteurs se réveillent périodiquement pour vérifier s'il y a une communication en cours. Lorsqu'un nœud a une trame à envoyer, il envoie un long préambule avant la transmission effective des données. Cependant, ce mécanisme oblige tous les nœuds voisins de l'émetteur à rester actif jusqu'à la fin de la transmission des données, même si la trame ne leur est pas destinée. B-MAC souffre donc de réveils inutiles, ce qui génère une consommation inutile de l'énergie. [27]

b. Les protocoles MAC synchrones :

Les protocoles MAC synchrones ont pour but de faire coordonner les phases de réveil des nœuds afin qu'ils se réveillent en même temps et ainsi puissent s'échanger leurs données sans problèmes de connectivité tout en économisant l'énergie. Il existe de nombreux protocoles MAC synchrones comme par exemple S-MAC,

Dans S-MAC (*Sensor-MAC*) [28], les nœuds commutent entre périodes d'activités et périodes d'inactivité, tous les nœuds d'un même voisinage partagent la même période de réveil afin d'éviter le problème de surdité.

c. Les protocoles MAC Frame-Slotted :

Les protocoles MAC frame-slotted [29] allouent des slots de temps de manière à ce qu'aucun nœud dans le voisinage de communication à deux sauts ne soit assigné au même slot de temps. Avec cela, on peut surmonter le problème de collision mais il reste le problème du terminal caché [30] (voir l'annexe). Parmi les protocoles MAC frame-slotted les plus connus nous présentons le protocole Z-MAC (*Zebra MAC*) [29] [31] Z-MAC est utilisé pour améliorer l'utilisation des canaux en incorporant le CSMA dans TDMA. Z-MAC applique DRAND (répartition aléatoire distribuée) pour l'attribution d'intervalles de temps. DRAND garantit que deux nœuds dans le voisinage de communication à deux sauts ne sont pas affectés au même emplacement.

d. Les protocoles MAC multi-canal :

Ces protocoles MAC ont été proposés comme solution non seulement aux collisions, mais aussi aux problèmes de réduction de capacité du réseau, dans le but de diminuer les délais. L'utilisation des canaux multiples aide à surmonter les interférences ainsi qu'à améliorer l'ensemble des performances du réseau. Le challenge est de distribuer des canaux dans un réseau. Un canal est centré sur une fréquence particulière généralement allouée pour un certain temps. Cette allocation peut être effectuée pour chaque lien, pour chaque émetteur et pour chaque récepteur. [32]

MC-LMAC allie les deux techniques TDMA et FDMA. Chaque nœud devra choisir un slot temporel aussi qu'un canal de communication, chaque nœud dans MC-LMAC aura un slot temporel qu'il occupera exclusivement dans son voisinage à 2 sauts. Ce protocole a pour inconvénients d'introduire un important *overhead* : la transmission de chaque trame doit être précédée d'une trame de contrôle. [33]

Le but de MC-LMAC est de maximiser le débit du réseau de capteurs en coordonnant les transmissions sur plusieurs canaux. Ce protocole garantit que le même slot/canal n'est pas utilisé simultanément par des voisins à 2-sauts. Chaque slot est composé de deux parties. La première partie est consacrée à la signalisation, durant laquelle tous les noeuds commutent leur module radio sur le canal de contrôle. La deuxième partie du slot est utilisée pour transférer les données. Chaque noeud ayant des données à transmettre au noeud destinataire doit le rejoindre sur son canal de communication. Lorsqu'un noeud n'a pas de données à envoyer, il doit commuter son canal sur le canal de contrôle pour voir si un noeud veut communiquer avec lui. Chaque noeud gère un vecteur de slots occupés pour chaque canal avec une longueur égale au nombre de slots de temps. Chaque bit dans ce vecteur est mis à 1 si le slot de temps à la même position est occupé. Ensuite chaque noeud envoie ce vecteur à ses voisins à un saut. [32]

Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fils sont rencontrés dans plusieurs domaines d'application : médical, environnementale, militaire, etc. Ils présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Les réseaux de capteurs se caractérisent par une capacité d'énergie limitée. Afin de prolonger la durée de vie du réseau, il est donc nécessaire de prendre en considération l'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils.

Le mécanisme de récupération d'énergie.

Introduction

Ce chapitre présente l'état de l'art sur la récupération de l'énergie et plus précisément sur la récupération de l'énergie radiofréquence (RF). Il sera donc composé de deux parties : Une généralité sur la récupération de l'énergie et la récupération d'énergie RF. La première présente l'architecture de la récupération d'énergie ainsi que les différentes sources d'énergie exploitées à nos jours (photovoltaïque, thermique, mécanique...). Dans la seconde on présentera la récupération d'énergie RF, son architecture, on détaillera aussi le modèle de propagation d'énergie RF, la sources de récupération d'énergie RF et on citera quelques applications existantes de la récupération d'énergie RF.

Partie 1 : La récupération d'énergie.

Introduction

La technologie de récupération d'énergie attire beaucoup d'attention et représente un avenir prometteur pour la production d'énergie électrique. Ce procédé offre diverses sources d'énergie alternatives respectueuses de l'environnement. Dans cette partie on parlera de la récupération d'énergie et on citera quelques types de sources d'énergie.

1 Objectif de la récupération d'énergie dans RCSF

Les premiers nœuds capteurs étaient munis de petites batteries et la durée de vie est ainsi limitée. Les chercheurs ont donc pensé à remplacer les petites batteries par d'autres qui soient plus puissantes mais le coût et la taille des capteurs étaient deux paramètres à prendre en charge. D'autre part, quelques réflexions ont abordé les problématiques liées aux réseaux de capteurs tout en spécifiant la maximisation de la durée de vie comme fonction objective. Cependant, la durée de vie reste toujours limitée et bornée. Une autre alternative a récemment émergé qui consiste à intégrer un système de récupération d'énergie dans chaque nœud capteur.

En d'autres termes, la récupération d'énergie permet de maximiser la durée de vie du réseau, offre des avantages économiques en évitant les coûts non négligeables de remplacement des batteries et permet d'avoir des capteurs autonomes. [34]

2 La récupération d'énergie

La récupération d'énergie existe depuis des siècles sous la forme des moulins à vent et à eau, et des systèmes d'énergie solaire passif, etc., [35][33]. Par définition, la récupération d'énergie est le processus qui consiste à obtenir l'énergie à partir de l'environnement externe (lumière solaire et artificielle, mouvements vibratoires, chaleur, rayonnement électromagnétique, ...) et de transformer cette énergie en une énergie électrique directement exploitée par les nœuds capteurs et, à son tour, augmenter leur durée de vie. [36]

3 L'architecture de la récupération d'énergie

Globalement, la récupération d'énergie peut être divisée en deux architectures : "Récupérer-Utiliser" (*Harvest-Use*) et "Récupérer-Stocker-Utiliser" (*Harvest-Store-Use*).

-Architecture Récupérer-Utiliser : Dans ce cas, le système de récupération alimente directement le nœud de capteur. Si l'énergie suffisante n'est pas disponible, le nœud sera désactivé, et puisque l'énergie récupérée est utilisée immédiatement, il n'y a aucune perte due à l'inefficacité et aux fuites du stockage. [36]

-Architecture Récupérer-Stocker-Utiliser : consiste en un composant de stockage qui stocke l'énergie récupéré et alimente également le nœud de capteur. L'énergie est stockée pour être utilisée plus tard lorsque l'opportunité de récupération n'existe pas ou que l'utilisation d'énergie du nœud de capteur doit être augmentée pour améliorer les capacités et les paramètres de performance. [36]

4 Les sources de récupération d'énergie

Le choix de la source d'énergie est très important, alors que certaines sources peuvent être très constantes, contrôlables et prévisibles, d'autres peuvent se comporter de manière stochastique. Ils existent plusieurs sources de récupération d'énergie qui vont être détaillés ci-dessous.

a. L'énergie Solaire

Dans cette technique, la batterie des nœuds de capteurs est rechargée à partir de l'énergie solaire, mais la disponibilité de l'énergie dépend de la position du système de récupération. Pour augmenter la densité de puissance il faut utiliser des panneaux plus grands avec une surface plus grande. Cependant, ceci n'est pas pratique dans les RCSF. [37]

b. L'énergie radiofréquence

Depuis quelques années, des applications sans fil (FM, TV, GSM, WIFI, WIMAX...) de faibles ou grandes puissances, ont envahi notre environnement. Ce qui a engendré une multiplication des émetteurs dans le paysage urbain. La plupart de ces émissions sont omnidirectionnelles et permanentes dans le temps. La disponibilité de cette énergie rayonnante peut devenir intéressante pour certaines applications de faible consommation. La récupération de cette énergie peut représenter une alternative énergétique capable de remplacer, totalement ou en partie, la batterie de certains microsystemes. [38]

c. L'énergie thermique

La plupart des environnements sont le lieu d'échanges thermiques, où de l'énergie évacuée sous forme de chaleur peut être récupérée et convertie en électricité. L'effet thermoélectrique a été découvert par le physicien *Thomas Johann Seebeck* en 1821. Cet effet se traduit par le passage d'un courant électrique dans un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de chaleur.

Basées sur ce principe, les sources thermoélectriques convertissent la différence de température entre deux milieux, en électricité. Des produits industriels sont apparus sur le marché, comme la montre de Seiko. Cette montre contient 10 modules thermoélectriques qui génèrent quelques microwatts pour faire fonctionner la montre. [39]

d. L'énergie mécanique

La récupération d'énergie mécanique peut couvrir diverses formes : notre environnement est sans cesse soumis à des vibrations, des forces de pressions ou encore des flux d'airs ou de liquides. Les vibrations mécaniques ambiantes sont de natures diverses : elles sont généralement dues aux machines tournantes, mais peuvent également être induites dans le sol et les murs par les véhicules ou la météo (vent, pluie...). Ces ressources dépendent de la fréquence de vibration et de l'accélération. Il est donc possible de les quantifier lorsque l'on connaît toutes les caractéristiques des vibrations. [40] Dans [41], un générateur de micro-puissance de récupération basé sur les vibrations est utilisé pour piéger les vibrations de l'environnement à utiliser dans un nœud de capteur. De même, un système qui récupère l'énergie des forces exercées sur une chaussure pendant la marche a été démontré [42] et des emplacements intérieurs, comme des escaliers, sont des lieux potentiels de récupération d'énergie vibratoire pour alimenter des capteurs environnementaux sans fil.

e. L'énergie piézoélectrique

Les capteurs d'énergie à vibration piézoélectrique convertissent l'énergie de vibration mécanique en énergie électrique alternative (AC). Cette AC est ensuite convertie électroniquement en DC (Courant directe), qui peut être utilisé pour piloter une multitude d'applications sans fil ou recharger une batterie. Pour cela, les auteurs dans [43] ont développé une chaussure génératrice d'énergie en utilisant les céramiques piézoélectriques et en appliquant un mécanisme qui agrandi la force appliquée à travers un système hydraulique. Ce générateur permet de récupérer une puissance moyenne de 0,85 W au cours de la marche normale d'une personne qui pèse 75 Kg et sans

causer d'incident sur son activité de marche.

Conslusion

La récupération d'énergie a été développée dans plusieurs études de la littérature depuis plus qu'une décennie. Elle permet d'utiliser ces générateurs dans de multiples applications intéressantes telles que les capteurs sans fil et les appareils électroniques. Dans cette partie nous avons présenté la technologie de récupération d'énergie ainsi que ces deux architectures récupérer-utiliser et récupérer-stocker-utiliser. Finalement nous avons détaillés les différentes sources de récupération d'énergie.

Partie 2 : La récupération d'énergie radiofréquence.

Introduction

Récemment, il y a eu une recrudescence des intérêts de recherche sur la technique de récupération d'énergie radiofréquence (RF) qui est la capacité de convertir les signaux RF reçus en électricité. Cette technique devient une solution prometteuse pour alimenter les réseaux sans fil. Dans cette partie, nous décrirons d'abord l'architecture générale d'un RF-EHN et introduirons la technique de récupération d'énergie RF. Finalement, nous passerons en revue les applications existantes de RF-EHNs.

1 La récupération d'énergie RF

La récupération d'énergie RF a également ses propriétés distinctives par rapport aux autres méthodes de récupération d'énergie, telles que l'énergie solaire, géothermique et les vibrations. Les sources d'énergies renouvelables de la nature sont incontrôlables, de sorte que la récupération d'énergie renouvelable ne garantit pas l'exigence de QoS (voir l'annexe). La technique de récupération d'énergie RF surmonte la limitation ci-dessus, et elle utilise une source d'énergie pour diffuser un signal porteur d'énergie constant. De plus la puissance transmise est contrôlable. La récupération d'énergie RF peut être utilisée dans les réseaux de communication pour charger des appareils mobiles à distance. Étant donné que la quantité de puissance récupérée dépend de la distance, les différents récupérateurs d'énergie sont placés dans divers endroits. La différence la plus significative entre la récupération d'énergie RF et d'autres méthodes de récupération d'énergie est que la récupération d'énergie RF peut produire la puissance stable dans l'environnement. Néanmoins, d'autres méthodes de récupération d'énergie sont incontrôlables, passives pour générer de l'énergie. Par conséquent, la récupération d'énergie RF est extrêmement appropriée pour le réseau de communication actuel. [44]

2 Architecture d'un RF-EHN

L'architecture du RF-EHN se compose généralement de trois composants principaux, comme représenté dans la figure 2.1, à savoir des passerelles d'informations, les sources d'énergie RF et les nœuds / dispositifs de réseau.

Les passerelles d'information sont généralement appelées stations de base, routeurs sans fil et relais.

Les sources d'énergie RF peuvent être soit des émetteurs d'énergie RF dédiés, soit des sources RF ambiantes (par exemple des tours de télévision).

Les nœuds de réseau sont les équipements d'utilisateur qui communiquent avec les passerelles d'information. Typiquement, les passerelles d'information et les sources d'énergie RF ont une alimentation électrique continue et fixe, tandis que les nœuds de réseau récupèrent l'énergie des sources RF pour supporter leurs opérations. Dans certains cas, la passerelle d'information et la source d'énergie RF peuvent être identiques. Comme le montre la figure 2.1, les flèches pleines représentent les flux d'information, les flèches pointillées représentent les flux d'énergie. [44]

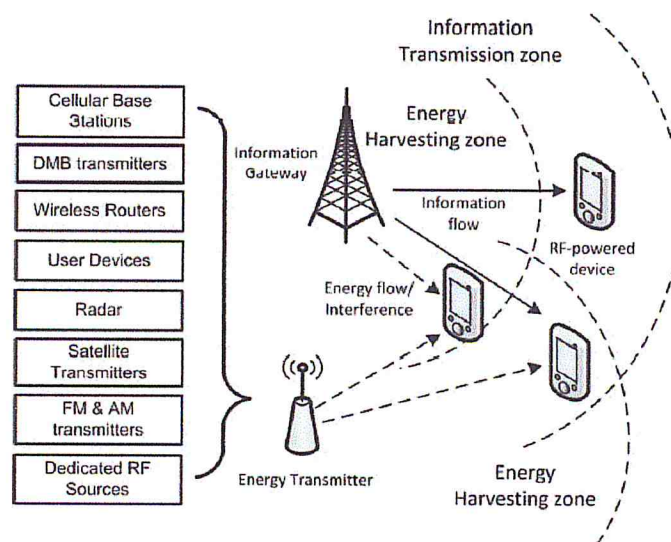


FIGURE 2.1: Une architecture générale d'un RF-EHN.

[44]

La passerelle d'information : comporte une zone de récupération d'énergie et une zone de transmission d'informations représentée par les cercles en pointillés sur la figure 2.1. Les dispositifs dans la zone de récupération d'énergie sont capables de capter l'énergie RF à partir de la passerelle d'informations. Les dispositifs dans la zone de transmission d'informations peuvent décoder

avec succès les informations transmises par la passerelle. Généralement, la puissance de fonctionnement du composant de récupération d'énergie est beaucoup plus élevée que celle du composant de décodage d'informations. Par conséquent, la zone de récupération d'énergie est plus petite que la zone de transmission d'informations. [44]

Le nœud de réseau : doit avoir une application exploitant des fonctions du réseau, un microcontrôleur traitant les données de l'application, un émetteur-récepteur pour la transmission ou la réception d'informations, un récupérateur d'énergie, composée d'une antenne RF, d'une adaptation d'impédance, d'un multiplicateur de tension et d'un condensateur, pour collecter les signaux RF et les convertir en électricité, un module de gestion de l'alimentation, qui décide s'il faut stocker l'électricité obtenue à partir du récupérateur d'énergie RF ou l'utiliser pour la transmission d'informations immédiatement et une batterie pour stocker l'énergie.

Pour le module de gestion de l'alimentation, il peut utiliser deux protocoles pour gérer l'énergie, c'est-à-dire, « Récupérer-Utiliser » ou « Récupérer-Stocker-Utiliser ». [44]

Dans le nœud de réseau, le récupérateur d'énergie RF est la partie qui collecte le signal RF et le convertit en électricité. Le récupérateur d'énergie RF est composé d'un module d'antenne, d'une adaptation d'impédance, d'un multiplicateur de tension et d'un condensateur. L'antenne peut être conçue pour fonctionner sur une ou plusieurs bandes de fréquence, dans lesquelles le nœud de réseau peut récupérer à partir d'une ou de plusieurs sources simultanément. L'adaptation d'impédance est placée entre le module d'antenne et le multiplicateur de tension pour maximiser le transfert de puissance. Le composant principal du multiplicateur de tension est constitué par les diodes du circuit redresseur qui convertissent les signaux RF (signaux AC dans la nature) en tension continue DC. Le condensateur peut également servir de réserve pendant une courte durée.

L'architecture du récupérateur d'énergie RF est présentée à la figure 2.2.

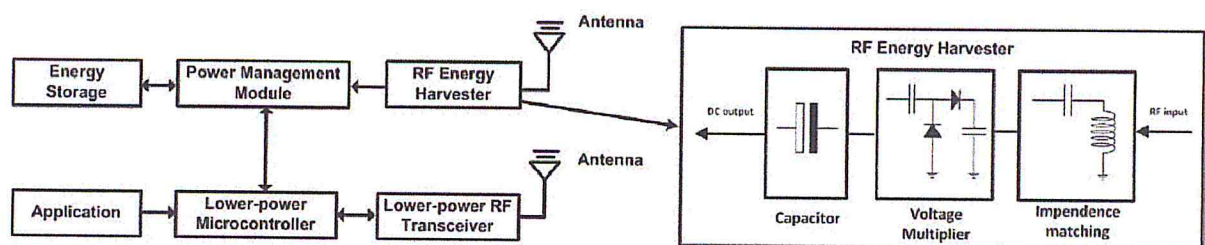


FIGURE 2.2: Une architecture générale d'un dispositif de récupération d'énergie RF.

[44]

Pour l'architecture du nœud général présentée ci-dessus, le récupérateur d'énergie RF est séparé de l'émetteur-récepteur RF de faible puissance. Par conséquent, le nœud peut effectuer une collecte d'énergie et une communication de données simultanément. En d'autres termes, cette architecture prend en charge la récupération d'énergie RF intrabande (*in-band*) et hors bande (*out-of-band*). Dans la récupération d'énergie RF intrabande, le nœud de réseau peut récupérer l'énergie RF à partir de la même bande de fréquence que celle de la communication de données. En revanche, dans la récupération d'énergie RF hors bande, le nœud de réseau récupère l'énergie RF de la bande de fréquence différente de celle utilisée pour la communication de données. [44]

3 Modèles de propagation d'énergie RF

Dans la récupération d'énergie RF, la quantité d'énergie qui peut être récupérée dépend de la puissance d'émission, de la longueur d'onde des signaux RF et de la distance entre une source d'énergie RF et le nœud de récupération. La puissance RF récupérée d'un émetteur en espace libre peut être calculée sur la base de l'équation de *Friis* [45] comme suit :

$$P_R = P_T \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (2.1)$$

Où P_R est la puissance reçue, P_T est la puissance d'émission, L est le facteur de perte de chemin, G_T est le gain d'antenne d'émission, G_R est le gain d'antenne de réception, λ est la longueur d'onde émise et d est la distance entre l'antenne d'émission et l'antenne du récepteur. Le modèle d'espace libre suppose qu'il y a qu'un seul chemin entre un émetteur et un récepteur. Cependant, en raison de la diffusion et de la réflexion RF, un récepteur peut récupérer des signaux RF provenant d'un émetteur à partir de chemins multiples. Le modèle de base à deux rayons capture ce phénomène en considérant que les signaux RF reçus traversent un chemin en visibilité directe et un chemin réfléchi séparément. La puissance RF récoltée d'un émetteur selon le modèle de base à deux rayons est donnée par :

$$P_R = P_T \frac{G_t G_r h_t^2 h_r^2}{(d)^4 L} \quad (2.2)$$

Où h_t et h_r sont les hauteurs des antennes d'émission et de réception, respectivement. Les deux modèles déterministes ci-dessus caractérisent la propagation RF basée sur des paramètres déterminés. En revanche, les modèles probabilistes tirent des paramètres d'une distribution, tout en permettant une modélisation plus réaliste. Un modèle probabiliste pratique et largement adopté est un modèle de *Rayleigh* [46], qui représente la situation lorsqu'il n'y a pas de canal de visibilité directe entre un émetteur et un récepteur. Dans le modèle de *Rayleigh*, nous avons :

$$P_R = P_R^{det} * 10^L * \log(1 - unif(0, 1)) \quad (2.3)$$

Où P_R^{det} représente la puissance RF reçue calculée par un modèle déterministe. Le facteur de perte de trajet L est défini par $L = -\alpha \log_{10}(d / d_0)$, où d_0 est une distance de référence. *unif*(0, 1) désigne un nombre aléatoire généré suite à une distribution uniforme entre 0 et 1.

4 Les sources de récupération d'énergie RF

Il existe deux types de sources d'énergie utilisées dans la collecte d'énergie RF, la source dédiée et la source d'énergie ambiante. La source d'alimentation dédiée utilise des antennes directives pour répondre aux exigences QoS du réseau avec la puissance transmise constante.

L'application commerciale de la source d'énergie dédiée est le *Powercaster* qui fonctionne à 915 MHz avec une puissance transmise de 1 W ou 3 W. En raison de la santé et de la sécurité des êtres humains, il existe certaines limitations concernant la puissance de sortie de la source d'énergie RF dédiée, telle que la régulation FCC (*Federal Communications Commission*).

La source ambiante est le signal RF qui a été transmis dans le canal sans fil. Le récupérateur d'énergie RF peut collecter de manière opportuniste le signal RF ambiant pour se charger lui-même. Certains signaux RF ambiants peuvent être recueillis en tant qu'énergie, tels que la station de base du téléphone cellulaire et le signal diffusé par les tours de télévision ou de radio.

Dans [47], les auteurs ont analysé les performances du système d'un capteur alimenté sans fil par les sources d'énergie ambiante.

5 Applications existantes de la récupération d'énergie

Les réseaux de capteurs sans fil sont devenus l'une des applications les plus largement appliquées des RF-EHN. Les appareils alimentés par RF ont également des applications médicales et de soins de santé attrayantes, telles qu'un réseau corporel sans fil. Bénéficiant de la récupération d'énergie RF, les dispositifs médicaux de faible puissance peuvent obtenir une alimentation à la demande en temps réel à partir de sources RF dédiées, ce qui permet en outre un circuit sans batterie de taille réduite. Dans [48], les auteurs conçoivent le circuit intégré spécifique à l'application écoénergétique RF, avec un protocole de travail à la demande. Dans [49], les auteurs présentent un circuit de dispositif corporel bi-bande fonctionnant au GSM 900 et au GSM 1800. Une autre application de collecte d'énergie RF qui a fait l'objet de recherches intensives est la RFID, largement utilisée pour l'identification, le suivi et la gestion des stocks. [50]

Outre les applications populaires ci-dessus, les appareils alimentés par l'énergie RF ambiante attirent de plus en plus l'attention de la recherche. Par exemple, la référence [51] démontre qu'un taux d'information de 1 kbps peut être atteint entre deux prototypes alimentés par des signaux RF ambiants, à une distance allant jusqu'à 2,5 pieds et 1,5 pieds pour l'extérieur et l'intérieur, respectivement.

6 Conception de l'architecture du récepteur

La réception d'informations et la récupération d'énergie RF fonctionnent avec une sensibilité de puissance très différente. (par exemple, -10 dBm pour les capteurs d'énergie contre -60 dBm pour les récepteurs d'informations) [50]. Cela inspire les efforts de recherche dans la conception des récepteurs. Parmi elles nous citons trois types d'architecture du récepteur.

- **Architecture de récepteur séparé :** Dans cette architecture le récupérateur d'énergie et le récepteur d'information ont des antennes indépendantes afin qu'ils observent différents canaux comme montré dans la figure 2.3. Le réseau d'antennes est divisé en deux ensembles reliés chacun à un récupérateur d'énergie ou à un récepteur d'information. Par conséquent, l'architecture permet de réaliser la récupération d'énergie et la réception d'information indépendamment et simultanément. Cette architecture peut être utilisée pour optimiser les performances du réseau. [44]

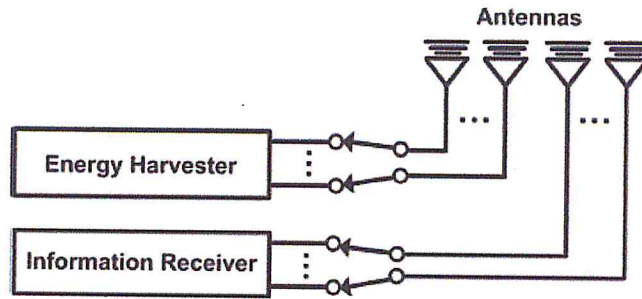


FIGURE 2.3: Architecture de récepteur séparé.
[44]

• **Architecture de récepteur co-localisée** : Contrairement à une architecture de récepteur séparée, elle est capable de permettre une taille plus petite car elle permet à un récupérateur d'énergie et à un récepteur d'information de partager la même ou les mêmes antennes de sorte qu'ils observent le (s) même (s) canal (s). Cette architecture peut être classée en deux modèles, c'est-à-dire des architectures de commutation temporelle (*Time Switching*) et de diviseur de puissance (*Power Splitting*). Selon la commutation temporelle, le nœud de récupération d'énergie bascule entre le récupérateur de puissance et la réception d'information pendant différentes allocations de temps. La structure de la commutation temporelle est représentée sur la figure 2.4. [44]

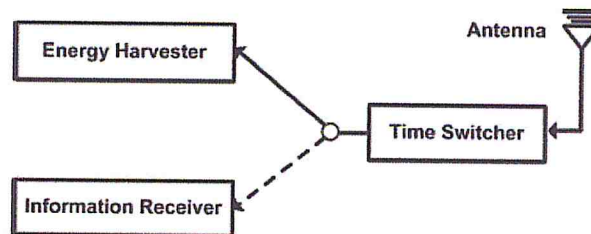


FIGURE 2.4: Architecture de la commutation temporelle.
[44]

Dans l'architecture de diviseur de puissance, comme représenté sur la figure 2.5, les signaux RF reçus sont divisés en deux flux pour le récepteur d'information et le récupérateur d'énergie RF avec différents niveaux de puissance.

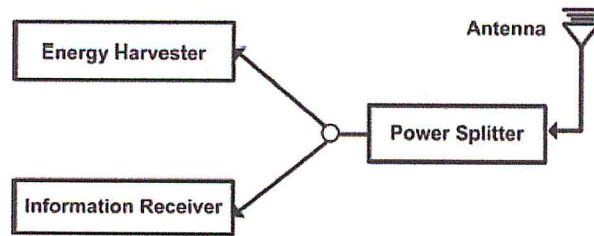


FIGURE 2.5: Architecture de diviseur de puissance.
[44]

• **Architecture du récepteur Intégrée :** Cette architecture qui a été proposée dans [52] est la plus optimale par rapport aux deux architectures mentionnées ci-dessus. La mise en œuvre de la conversion RF pour le décodage de l'information est intégrée au récupérateur d'énergie via le redresseur. Par conséquent, cette architecture permet un facteur de forme plus petit. La figure 2.6 montre le modèle de l'architecture du récepteur intégré. Notez que le contrôleur de flux RF peut également adopter un commutateur ou un diviseur de puissance, comme dans l'architecture du récepteur co-localisée. Cependant, la différence est que le commutateur et le diviseur de puissance sont adoptés dans l'architecture du récepteur intégré.

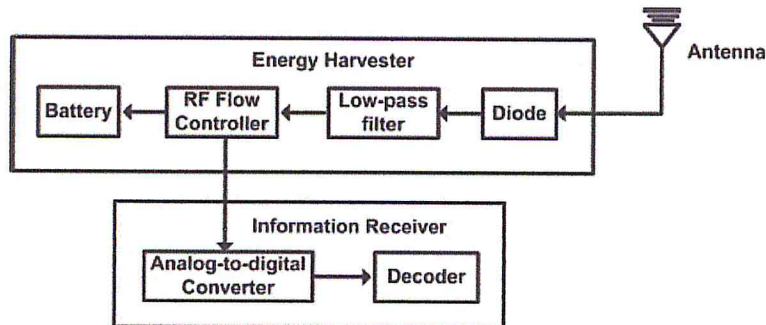


FIGURE 2.6: Architecture du récepteur Intégrée.
[44]

Les études de [52] montrent que lorsque les consommations d'énergie du circuit sont relativement faibles par rapport à la puissance du signal reçu, l'architecture du récepteur intégré surpasse l'architecture du récepteur co-localisé dans la région d'énergie élevée, tandis que l'architecture de récepteur co-localisée est supérieure dans une région d'énergie faiblement exploitée. Lorsque la consommation d'énergie du circuit est élevée, l'architecture du récepteur intégré fonctionne mieux. Il est également montré que pour un système sans besoin minimum d'énergie récupéré, le récepteur intégré atteint un débit d'informations plus élevé que celui du récepteur séparé sur de courtes distances de transmission.

Conclusion

Les RCSF qui sont alimentés par la récupération d'énergie ambiante sont une technologie prometteuse pour de nombreuses applications de détection car ils éliminent le besoin de remplacer les batteries. La récupération d'énergie à partir de l'environnement est considérée comme une option viable pour remplacer les alimentations électriques actuelles pour les systèmes embarqués à contrainte énergétique.

Comme la récupération d'énergie RF est contrôlable prédictible et constante dans le chapitre qui suit on s'intéresse au protocoles MAC basé sur les fréquences radios.

Etat de l'art sur les protocoles MAC basé sur des fréquences radio.

Introduction

La récupération d'énergie via les fréquences radio aide à créer des capteurs fonctionnant en permanence, où les émetteurs dédiés reconstituent le niveau de batterie résiduel du nœud grâce à des ondes radioélectriques dirigées (RF). Cependant, comme ce transfert radiatif est dans la bande, il impacte directement la communication de données dans le réseau, nécessitant une nouvelle perspective sur la conception du protocole de contrôle d'accès au support (MAC) pour partager correctement le canal pour ces deux fonctions critiques.

Dans ce chapitre nous avons effectué une étude sur les protocoles les plus cités en littérature, afin de comprendre leurs fonctionnements.

1 EA-MAC (Energy Adaptive MAC)

EA-MAC [53] est un protocole qui a été proposé dans le cadre des RCSF sous une topologie d'étoile, ou le réseau est constitué d'une station de base alimentée en courant constant, et qui émet de l'énergie RF pour alimenter les nœuds capteurs se situant à des dizaines de mètres de la Station de base. La récupération d'énergie se fait lors du sommeil de ces capteurs (*Sleeping time*).

Cependant cette topologie certes n'est pas coûteuse, mais connaît quelques problématiques : non seulement les nœuds capteurs n'ont pas le même temps de récupération d'énergie, du à leurs temps de sommeil différents, mais également, plus le capteur s'éloigne de la station de base, plus il consomme plus d'énergie lors de ses transmissions et a besoin de plus de temps de rechargement pour s'alimenter (Connu sous le nom du *Near Far Problem*).

En 2011, les auteurs dans [53] ont proposés une gestion de cycle de service adaptative en énergie et une gestion de contention adaptative en énergie pour traiter ces problématiques.

- Dans le mécanisme de gestion de cycle de service adaptative en énergie d'EA-MAC, la gestion du cycle de service de chaque nœud de capteurs se fait en fonction de son taux de récupération d'énergie, le niveau d'énergie restant dans son stockage de batterie est utilisé.

Considérons deux états opérationnels majeurs des nœuds de capteurs : l'état actif et l'état endormi [53]. L'état actif est divisé en état de contention et en état de transmission. Initialement, un nœud de capteurs en état endormi passe à l'état actif pour accéder au canal, c'est-à-dire l'état de contention, lorsque son niveau d'énergie récupéré atteint son seuil de niveau d'énergie δ le nœud de capteur peut passer de l'état endormi à l'état actif. La valeur de δ est déterminée pour que le nœud de capteur ait suffisamment d'énergie pour transmettre au moins un paquet.

Si le nœud de capteur accède au canal avec succès, il passe dans l'état de transmission et transmet un paquet de données. Une fois la transmission du paquet terminée, le nœud de capteur retourne à l'état endormi. D'un autre côté, si le nœud de capteur ne parvient pas à accéder au canal dans l'état de contention, il revient immédiatement à l'état endormi. Une fois que le nœud de capteur passe à l'état endormi, il reste dans cet état jusqu'à ce que son niveau d'énergie atteigne de nouveau le seuil. De cette manière, le nœud de capteur répète les transitions entre les états actif et endormi en fonction de sa condition de récupération d'énergie.

• Dans le mécanisme de contention adaptative en énergie EA-MAC utilise un algorithme CSMA/CA basé sur l'algorithme CSMA/CA non-slotté de la norme IEE 802.15.4 [54]. La caractéristique principale de EA-MAC est qu'elle possède l'algorithme de contention adaptative en énergie dans lequel le délai d'attente (*backoff*) de chaque nœud de capteur est contrôlé en fonction de son taux de récupération d'énergie pour alléger le degré d'équité parmi les nœuds de capteurs. La figure 3.1 illustre le diagramme de transition d'état pour EA-MAC.

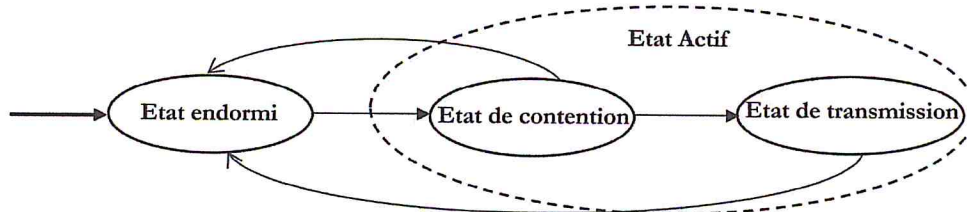


FIGURE 3.1: le diagramme de transition d'état pour EA-MAC.
[55]

2 RF-MAC (Radio Fréquence MAC)

Ce protocole a été proposé par [56] en 2013. RF-MAC prend en considération une topologie en étoile qui se compose de plusieurs stations de base muni d'un système leurs permettant de transmettre des ondes électromagnétiques, et de nœuds de capteurs qui ont l'habilité de récupérer ces ondes là, afin de transmettre les données captées. Chaque nœud transmet ses données à la station de base qui lui est la plus proche.

Lorsque plusieurs Transmetteurs d'Énergie (TE) transmettent la puissance à nœud, les ondes d'énergie émises simultanément peuvent se combiner de manière constructive ou destructive, conduisant à une variation dans la quantité de puissance récupérée et une éventuelle perte d'énergie. Les auteurs on prouver que dans le cas d'interférence constructive (*in phase*) la puissance récupérée est supérieure à celle des puissances d'énergie individuelle, alors que dans le cas d'une interférence destructive (*out phase*) la puissance récupérée est inférieure à celle des puissances d'énergie individuelle Cela soulève la question de savoir quels ensembles de TEs doivent être simultanément autorisé à transmettre par le protocole MAC.

Un exemple d'architecture de réseau, avec des TEs omnidirectionnels stationnaires, x, y et z, est représenté dans la figure 3.2. Le capteur S1 peut être chargé soit par une action unilatérale de

l'un des TEs, soit par une transmission coordonnée de plusieurs TEs.

Cependant, l'action conjointe ne peut être bénéfique que si les ondes arrivant au capteur S1 sont alignées en phase. Par conséquent, les TEs x et z peuvent transmettre ensemble, tous les deux étant à un multiple de la longueur d'onde du signal λ (ce qui se traduit par une différence de phase qui entraîne une interférence « constructive ») alors que le capteur peut également être chargé par TE y, l'action de y avec l'un des autres diminuent la performance (en provoquant une interférence « destructive » par rapport à x et z). [56]

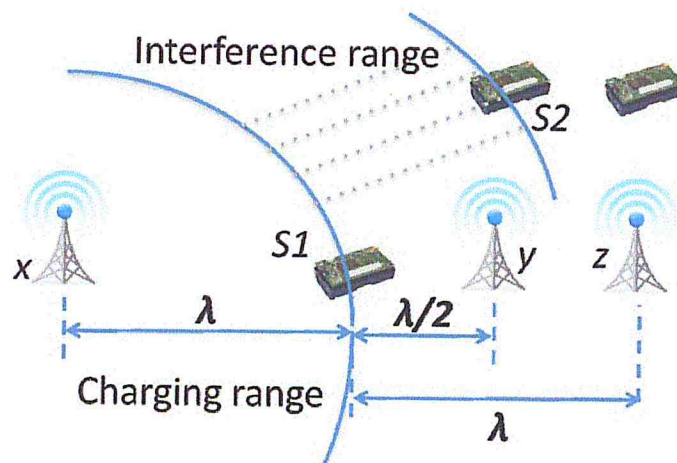


FIGURE 3.2: Exemple d'architecture de réseau avec des transmetteurs d'énergie (x, y, z) et des capteurs de collecte RF (S1, S2).

[56]

Pour caractériser l'effet constructif et destructif des TEs, l'installation expérimentale dans [56] impliquait deux émetteurs d'onde continue 0 dB, placé chacun à 2.5m de chaque côté du récepteur. Deux générateurs de signaux RF, chacun connecté à une antenne omnidirectionnelle. La phase des deux générateurs est différente, et leurs emplacements sont fixes. La chute de la puissance du signal est illustrée dans la figure 3.3, a été spectaculaire lorsque les TEs fonctionnaient en opposition *in phase* (-54 dBm) par rapport au fonctionnement *out phase* (-36 dBm). [56]

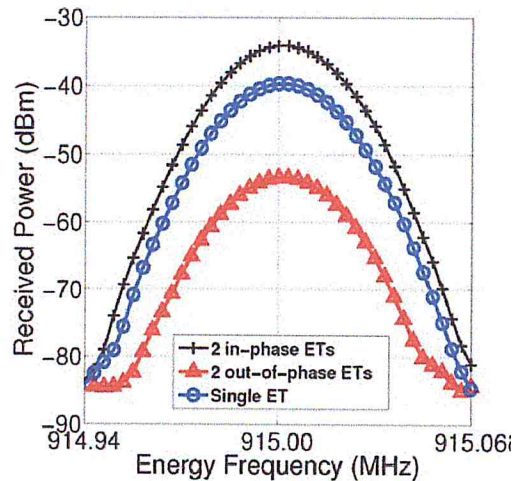


FIGURE 3.3: L'effet de différence de phase sur la puissance du signal reçu à 915 MHz. [56]

2.1 Le temps de chargement

Une zone beaucoup plus grande devient inutilisable pour la communication de données. Par exemple sur la figure 3.2, même si S2 est situé à une distance considérable de TE 'x', il tombera toujours dans sa bande d'interférence (montrée par la zone en pointillés) et incapable de recevoir des données. Ainsi, les nœuds de capteurs doivent équilibrer les temps de communication et de charge pour éviter des durées de communication prolongées et allouer des durées de charge par demande d'énergie basée sur la charge de trafic pour synchroniser de manière adaptative les demandes de consommation et de récupération d'énergie. En conséquence, la durée effective pour laquelle le chargement est autorisée joue un rôle important dans la performance et la conception d'un nouveau protocole MAC. [56]

2.2 Aperçu du protocole RF-MAC

Le mécanisme de contrôle d'accès au support dans le protocole RF-MAC est organisé en trois composantes : la sélection conjointe du TE, la sélection du seuil de charge adaptative et la priorité d'accès énergétique. Nous donnons maintenant une vue d'ensemble du protocole RF-MAC.

- **Sélection commune du TE** : dans cette phase, le nœud demandeur d'énergie émet son paquet de demande d'énergie. Les TEs qui reçoivent cette requête se séparent indépendamment en deux groupes légèrement séparés dans la fréquence centrale, mais toujours contenus dans la bande de transmission. Les TEs utilisent la force du signal de la demande d'énergie pour estimer leurs dis-

tances individuelles au capteur demandeur pour identifier dans quel groupe ils appartiennent et répondre avec une impulsion CFE (*Cleared For Energy*). Le capteur demandeur résout un cadre d'optimisation pour assigner des fréquences centrales à ces deux groupes.

- **Seuil de charge adaptatif** : dans cette phase, le nœud de capteur de demande d'énergie détermine son seuil de niveau de charge supérieur et la durée de charge, en fonction de ses conditions de réseau local. Ce seuil est unique pour un nœud donné. La durée de chargement détermine la durée de perturbation de la communication de données.

- **Priorité d'accès énergétique** : Cette phase a deux fonctionnalités principales. Tout d'abord, il donne une plus grande priorité aux paquets de demande d'énergie que les paquets de données pour accéder au canal en définissant des durées différentes pour le temps d'intervalle pour l'accès aux données et à l'énergie. Deuxièmement, il adapte le délai d'attente du capteur en fonction de son énergie résiduelle. Ainsi, le capteur avec une énergie résiduelle plus élevée a une priorité d'accès plus élevée pour la communication de données. [56]

3 Polling MAC

Ce protocole considère un réseau de m nœuds en topologie d'étoile, constitué d'une station de base et des nœuds de capteur qui communique directement avec la station de base en utilisant la technique *Round-Robin* comme illustré dans la figure 3.4.

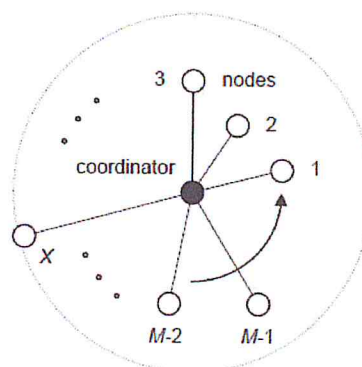


FIGURE 3.4: La topologie du réseau.

[57]

Le principe de ce protocole est simple, la station de base interroge explicitement chaque nœud en envoyant un paquet POLL avec l'adresse MAC du nœud. Chaque nœud doit écouter l'en-tête de chaque paquet POLL afin de vérifier l'identité (ID) du nœud interrogé, mais seul le nœud visé répond avec un paquet de données, si sa file n'est pas vide, ou avec un paquet NULL court, si c'est le cas, ce dernier signifiant qu'il a reçu le POLL mais n'a aucune donnée à fournir. Les autres nœuds restent inactifs pendant cette période. Ainsi, chaque nœud peut transmettre au plus un paquet de données dans un cycle d'interrogation donné.

Dès qu'un nœud détecte que son énergie restante a chuté en dessous d'un seuil donné, il demande une recharge en ajoutant une requête appropriée dans l'en-tête des premières données ou dans l'en-tête du paquet NULL qu'il envoie à la station de base. Cette dernière ajoute alors les informations sur une impulsion de recharge en attente sur l'en-tête du paquet POLL, et commence l'impulsion de recharge peu après.

Puisque les nœuds sont situés à des distances différentes de la station de base, la quantité d'énergie récupérée par le nœud est proportionnelle à la perte de chemin entre la station de base et le nœud donné. Les paquets peuvent être corrompus par le bruit et les interférences. La fiabilité de la transmission est prise en charge par une technique de demande de répétition automatique (ARQ) avec jusqu'à n_r tentatives pour le paquet.

En fonctionnement normal, le nœud doit utiliser l'énergie pour maintenir le processus de détection, recevoir les paquets POLL et / ou de données, écouter les en-têtes des autres paquets POLL et transmettre (ou retransmettre) les données et les paquets NULL lui-même. La variation d'énergie dans le temps dépendra de l'intensité du trafic du nœud, du taux d'erreur binaire, du seuil de fiabilité n_r et de la taille du réseau m .

Lorsque la quantité d'énergie d'un nœud i tombe au niveau du seuil, le nœud demandera une recharge. Notez que la demande de recharge peut être postée par n'importe quel nœud. Comme les nœuds ont des valeurs de perte de chemin différentes, leur énergie sera réapprovisionnée à différents niveaux après la recharge. Ceci est représenté schématiquement sur la figure 3.5.

Supposons qu'au début les nœuds ont une charge maximale, la première recharge sera demandée par le nœud qui a eu le plus grand nombre de cycles de transmission. Cependant, le nœud le plus éloigné de la station de base obtiendra la plus petite quantité d'énergie, ce nœud, noté X sur la figure 3.4, tandis que les autres nœuds ne draineront pas leurs batteries au seuil. En fait,

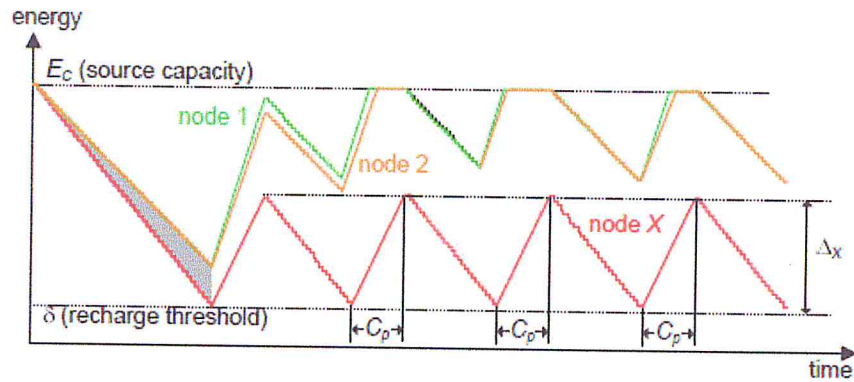


FIGURE 3.5: Les périodes de recharge et de dépense d'énergie. [58]

d'autres nœuds peuvent atteindre la pleine capacité de leurs batteries lors des périodes de recharge suivantes, comme le montre la figure 3.5.

Processus de chargement

Pendant un seul cycle d'interrogation, un nœud peut avoir trois types de dépense énergétique, ceux-ci sont donnés dans le tableau 3.1.

| Dépenses d'énergie | |
|---|---|
| Un cycle sans paquet de données | $E_z = E_p + (m - 2)E_a + E_{tn}$ |
| Un cycle avec la première tentative de transmission | $E_n = E_s + E_p + (m - 2)E_a + E_{td}$ |
| Un cycle avec retransmission de paquets | $E_r = E_p + (m - 2)E_a + E_{td}$ |

TABLE 3.1: Description des unités de consommation d'énergie au niveau du cycle d'interrogation. [58]

Où E_s la dépense énergétique pendant la détection, E_p la dépense énergétique pendant l'écoute du paquet POLL, E_a la dépense énergétique pendant l'écoute de l'entête du paquet POLL, E_{td} la dépense énergétique pendant la transmission du paquet de données et E_{tn} la dépense énergétique pendant la transmission du paquet NULL. La dépense énergétique E_z se produit lorsque la file du nœud est vide, Les deux autres unités de dépenses énergétiques, E_n et E_r , se produisent lorsque la file du nœud n'est pas vide.

Notez que la dépense d'énergie pour une nouvelle transmission de paquets diffère de celle nécessaire pour la retransmission du paquet existant. [58]

4 Zoning-MAC protocol

Pour régler le problème de la limitation en rechargement des nœuds se trouvant loin de la station de base, et pour généraliser le champs d'application, les auteurs dans [57] ont proposé un protocole un protocole améliorant le protocole Polling. Il consiste à divisé le réseau en zones et en secteurs, chaque zone contienne approximativement le même nombre de nœuds, les nœuds sont regroupés en zones selon leur distance par rapport à la station de base. Chaque secteur contient au maximum un nœud pour chaque zone de cette manière chaque nœud a un chemin contigu vers la station de base comme montré dans la figure 3.6.

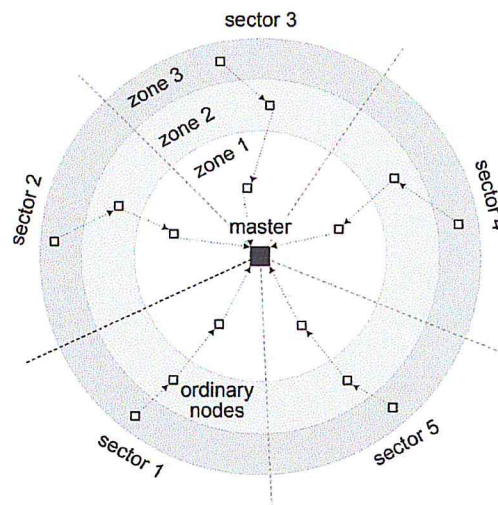


FIGURE 3.6: Le réseau avec décomposition en zones et secteurs.
[57]

- La transmission des paquets :

Dans chaque cycle d'interrogation la station de base envoie un paquet POLL contenant le numéro de secteur, tous les nœuds écoutent l'en-tête du paquet POLL : les nœuds qui n'entendent pas leur numéro de secteur peuvent se remettre immédiatement en veille. Après avoir entendu le paquet POLL, le nœud dans la zone la plus éloignée transmet un paquet (DATA, NULL) à un nœud du même secteur mais dans la zone inférieure suivante et se met immédiatement en veille. Le nœud relais retransmet ensuite le paquet à un nœud dans la zone inférieure suivante, suivi de son propre paquet (DATA, NULL). Ce processus continue jusqu'à ce que le nœud de la zone 1 envoie tous les paquets de son secteur à la station de base et cette dernière procède ensuite à l'interrogation du secteur suivant.[57]

- Le chargement :

Lorsqu'un nœud détecte que son énergie a chuté en dessous d'un certain seuil, il demandera une recharge en ajoutant les informations appropriées à l'en-tête de son propre paquet DATA ou NULL. Lors de la réception d'une telle requête, la station de base termine l'interrogation du secteur en cours et annonce l'impulsion de recharge à venir dans le prochain paquet POLL de secteur. C'est la raison pour laquelle tous les nœuds doivent écouter le paquet POLL quel que soit le secteur. Les nœuds les plus proches de la station de base dépensent plus d'énergie pour le relais de paquets que les nœuds qui se trouvent dans la zone j. [57]

5 RF Multichannel-MAC protocol

Les conditions de déploiement des RSCSF obligent les chercheurs à concevoir des protocoles et des nœuds économes en énergie. Pour cela, la plupart des protocoles MAC existants proposés pour les réseaux de capteurs sans fil utilisent un seul canal pour la transmission des données. Cependant, la contrainte du passage à l'échelle dans des applications telle que la surveillance environnementale, qui nécessite le déploiement d'un nombre important de nœuds, augmente la charge du réseau. Cette charge est encore plus significative lorsque le réseau fonctionne à haut débit en raison d'une génération de trafic en rafale qui peut être induit par la génération d'alarmes, ou lors de l'exécution simultanée de plusieurs applications. Dans ces conditions, l'utilisation d'un canal unique augmente la probabilité de collision, limite le débit du réseau, et le rend vulnérable aux interférences. Pour faire face à ces problèmes, en 2017 l'équipe de CERIST ont proposé un protocole RF Multichannel-MAC afin d'améliorer l'utilisation de la bande passante. L'exploitation de plusieurs canaux permet aux nœuds de transmettre en parallèle des données sur des canaux différents, ce qui augmente le débit et réduit les collisions. De plus, les chercheurs ont proposé d'allouer ces canaux à la récupération d'énergie des nœuds de capteurs en cas de besoins. Autrement dit, un nœud peut être alloué à un canal soit pour une transmission, soit pour un rechargement.

Un problème de gestion de canaux se manifeste dans ce cas-là, pour palier à ce problème, Ils ont proposé une solution préemption sur les canaux (interrompre le rechargement pour faire exécuter une transmission plus prioritaire pour avoir une bonne qualité de service).

Principe des protocoles MAC multi-canaux

Le challenge est de distribuer des ressources dans un réseau, ces ressources sont appelées des canaux. Un canal est centré sur une fréquence particulière généralement allouée pour un certain temps, en tenant compte des canaux réservés pour d'autres usages, des canaux exposés aux interférences et des canaux interdits pour des raisons diverses, tel que la contention, ce dernier utilise l'algorithme CSMA/CA pour accéder au canal. L'algorithme CSMA/CA est basé sur un tirage de temps aléatoire appelé le délai d'attente qui vise à désynchroniser les instants d'envoi des trames par des noeuds différents. Ce type de protocole est plus flexible et ne nécessite pas de messages de contrôle. Cette allocation des canaux peut être effectuée pour chaque lien, pour chaque émetteur, ou pour chaque récepteur. Dans le cas où plusieurs canaux sont utilisés, plusieurs noeuds peuvent transmettre des trames à travers des canaux différents simultanément ce qui augmente le débit, offre une protection robuste contre les interférences et augmente la capacité du réseau.[32]

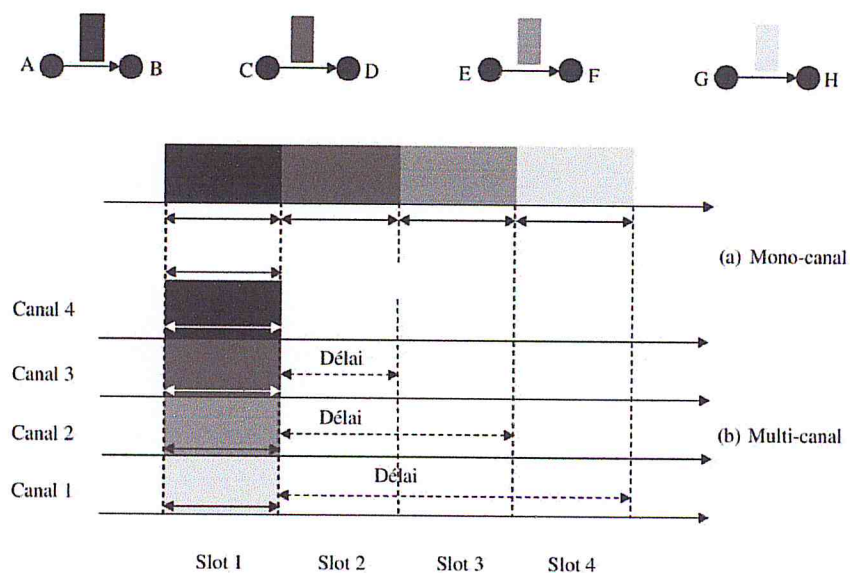


FIGURE 3.7: L'utilisation du monocanal et du multi-canal.
[32]

Les figures 3.7 (a) et (b) représentent une comparaison entre l'utilisation du monocanal et du multi-canal. Dans le cas de l'utilisation d'un seul canal, les quatre transmissions sont effectuées d'une façon séquentielle car une seule transmission peut se faire à la fois afin de limiter les collisions provenant des émissions simultanées de plusieurs noeuds. Alors que dans le cas de l'utilisation de plusieurs canaux où les quatre canaux (1, 2, 3 et 4) sont disponibles, les quatre

Chapitre 03 : Etat de l'art sur protocoles MAC basé sur des fréquences radio.

transmissions peuvent se produire en parallèle sans collision, ce qui améliore la bande passante et réduit les délais.[32]

* Pour récapituler, nous avons proposer le tableau ci-dessous pour résumer les protocoles MAC étudiés.

| Protocole | EA-MAC | RF-MAC | Polling-MAC | Zoning-MAC | RF Multichannel-MAC |
|--------------------------------------|---|--|---|---|---|
| Type de transmetteur | Station de base | Station de base et transmetteurs dédiés | Station de base | Station de base | Station de base |
| Nombre de Transmetteurs | un seul | plusieurs | un seul | un seul | un seul |
| Type de topologie | Etoile | Etoile | Etoile | Maillé | Etoile |
| Type de communication dans le réseau | un seul saut | un seul saut | un seul saut | plusieurs sauts | un seul saut |
| Principe | Le but était d'adapter le temps de rechargement et de contention pour optimiser l'énergie des capteurs se trouvant loin de la station de base | L'objectif de ces travaux était de regrouper les transmetteurs d'énergies afin d'optimiser la quantité d'énergie récupérée | Le but de ce protocole est de simplifier l'opération du rechargement et de donner une certaine équité à tous les capteurs se trouvant dans le réseaux | Le but de ce protocole de régler le problème des capteurs se trouvant loin de la station de base et qui consomment plus d'énergie que les autres pour la transmission en créant des zones de priorités. | Le but de ce protocole est d'augmenter le débit, offrir une protection robuste contre les interférences et augmenter la capacité du réseau ainsi que charger et transmettre en parallèle. |
| Date de publication | 2011 | 2013 | 2014 | 2017 | En cours de publication |

TABLE 3.2: Tableau résumant les protocoles MAC étudiés.

Conclusion

Contrairement aux réseaux traditionnels qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service, les réseaux de capteurs sans fil doivent, en plus, prendre en compte la conservation d'énergie.

Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque noeud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable. Dans un noeud capteur, l'énergie est consommée en assurant les fonctions suivantes : la capture, le calcul (traitement) et la communication. Cette dernière représente une grande portion de l'énergie totale consommée. De ce fait, la communauté de recherche a développé des protocoles MAC pour la conservation d'énergie.

Reste que les problématiques de positionnement des capteurs et de leurs nombres dans le réseau, affecte énormément l'efficacité du protocole MAC. Dans le chapitre qui suit, nous feront une étude comparative entre ces protocoles.

Analyse des résultats de simulations.

Introduction

Dans ce chapitre, les scénarios de simulation sont tout d'abord décrits. Leur choix s'est fait de telle façon à augmenter la complexité de la topologie progressivement. Les résultats des simulations des scénarios définis sont donnés par la suite, avec une étude comparative entre les différents protocoles simulés.

Les résultats exposés dans ce chapitre, sont issues des simulations réalisées avec MATLAB R2016a pour les 03 protocoles MAC qui traitent la même topologie (étoile) (Polling-MAC, EA-MAC) et un protocole proposé par l'équipe du CERIST qui est en cours d'étude (RF multichannel-MAC).

En dernier, nous avons simulé le réseau pour étudier la qualité de service offerte par ces protocoles.

1 Paramètres de simulations

Afin d'effectuer une étude comparative entre les différents protocoles MAC, deux scénarios ont été simulés. En commençant par le plus simple, un réseau contenant 06 nœuds jusqu'à simuler le comportement d'un réseau contenant 12 nœuds.

Dans chaque scénario, nous avons étudié le comportement du réseau par rapport à la densité du trafic du réseau (Génération de paquet chaque 15, 50 slots de temps).

Tous les protocoles ont été testés sous le même environnement, en utilisant les mêmes paramètres (voir tableau 4.1) en se basant sur la norme IEEE 802.11 :

- Les nœuds communiquent à 1 paquet de données de 05 bytes, avec une arrivée qui suit la loi de poisson qui a été fixée à $\lambda_1 = 0,13$ pour un réseau à trafic dense, et à $\lambda_2 = 0,04$ pour un réseau à trafic léger.
- L'arrivée des paquets suit une loi de poisson, nous avons fixé deux valeurs pour trafic léger et pour un trafic dense.
- La simulation des scénarios a été réalisée pour un laps de temps égale à 1800 slots de temps.
- L'énergie minimale pour un capteur afin qu'il demande un rechargement a été fixé à 1000J.

| | |
|----------------------------------|------------------------|
| Le temps de simulation | 1800 slots de temps |
| La taille du paquet DATA | 5 bytes |
| La taille du paquet RTS | 0.5 bytes |
| La taille du paquet ACK | 0.2 bytes |
| La taille du paquet NULL | 0.25 bytes |
| Le temps de génération de paquet | 15 / 50 slots de temps |
| Nombre de nœuds | 12 / 06 |
| Energie Electronique | 5 Joule |
| Energie d'amplification | 10 Joule |
| Puissance de transmission | 52 dBm |
| Gain de transmission | 25 dBi |
| Gain de réception | 15 dBi |
| Threshold | 500 Joule |
| Capacité de charge de nœud | 1000 Joule |

TABLE 4.1: Les paramètres de simulation.

Nous avons stocké nos résultats dans un fichier Excel externe pour une meilleure exploitation des données. Ce fichier contient l'identifiant du nœud, la distance de chaque nœud par rapport à la station de base, l'énergie initiale de chaque nœud.

Pour calculer l'énergie de transmission et l'énergie de réception on a travaillé avec le modèle de consommation d'énergie proposé dans [17] :

$$ETx(s, d) = (Eelec * s) + (Eamp * s * d^2) \quad (4.1)$$

$$ERx(s) = Eelec * s \quad (4.2)$$

Pour calculer le taux de chargement de chaque nœud on a utilisé l'équation de Friis [45] :

$$P_R = P_T \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (4.3)$$

2 Scénario 1 (12 nœuds)

Dans le chapitre précédent, nous avons noté que l'efficacité de tous les protocoles étaient fortement reliée au nombre de nœuds dans le réseau. Dans ce qui suit, nous étudierons le comportement de ce protocole dans un réseau contenant 12 nœuds (qui est assez important dans le cadre d'un réseau qui utilise l'énergie RF pour se recharger)

1 Polling-MAC

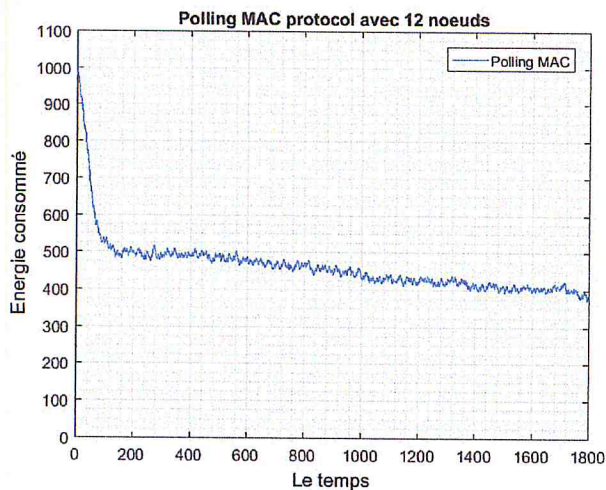


FIGURE 4.1.a: La moyenne de consommation d'énergie du protocole Polling-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic dense.

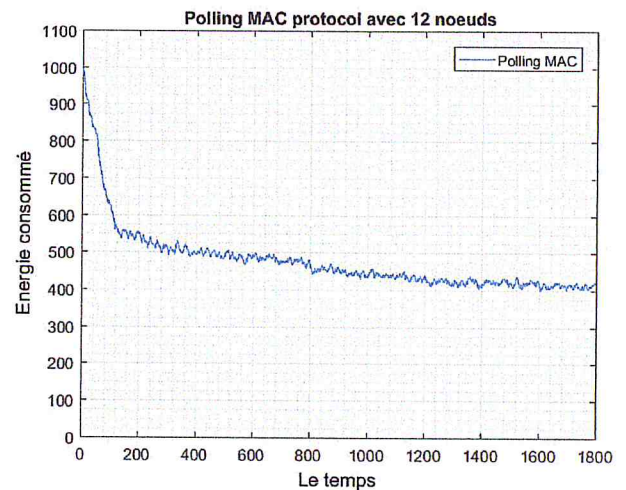


FIGURE 4.2.b: La moyenne de consommation d'énergie du protocole Polling-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic léger.

La figure 4.1.a représente les résultats de simulation du protocole Polling-MAC avec 12 nœuds et la génération de paquets chaque 15 slots de temps. (120 générations)

On remarque qu'à partir du 600 slot de temps la consommation d'énergie est en dessous du seuil et qui ne remonte pas avec le temps. Ce qui implique une disparition de certains nœuds du réseau.

La figure 4.1.b présente les résultats de simulations du protocole Polling-MAC avec 12 nœuds et la génération de paquets chaque 50 slots de temps. (36 générations)

Même en prolongeant la durée de génération de paquets (36 générations), et comparant avec les résultats de simulation présentés dans la figure 4.1.a, nous remarquons que le temps de génération de paquets n'a pas d'impact sur le protocole Polling-MAC avec 12 nœuds.

On en déduit que le protocole Polling-MAC n'est pas vraiment performant dans le cadre d'un grand réseau avec un trafic dense.

2 EA-MAC

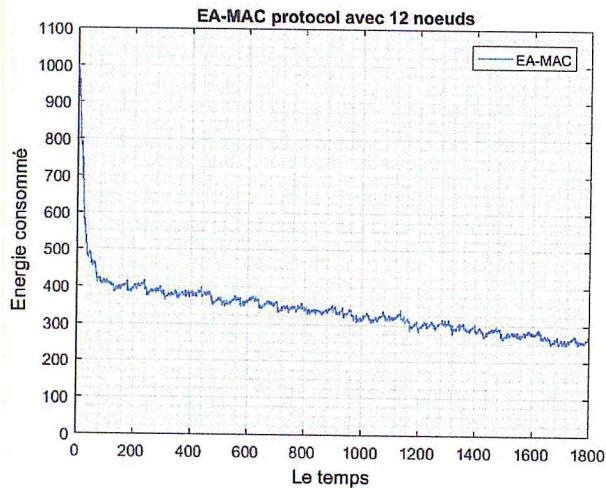


FIGURE 4.2.a: La moyenne de consommation d'énergie du protocole EA-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic dense.

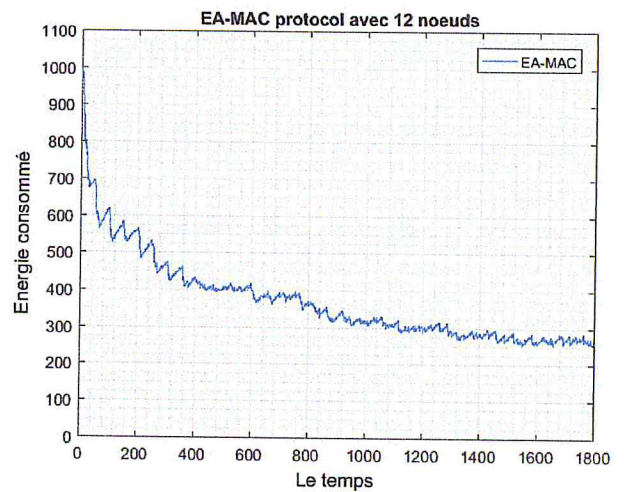


FIGURE 4.2.b: La moyenne de consommation d'énergie du protocole EA-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic léger.

La figure 4.2.a représente les résultats de simulation du protocole EA-MAC dans un réseau de 12 nœuds et la génération de paquets chaque 15 slot de temps.

A partir du 260 slot de temps la consommation d'énergie de ce protocole descend en dessous du seuil et continue à diminuer jusqu'à atteindre 260J à 1800 slot de temps. On en déduit que EA-MAC n'est pas très performant dans le cas d'un grand réseau avec un trafic dense.

La figure 4.2.b représente les résultats de simulation du protocole EA-MAC avec 12 nœuds et la génération de paquets chaque 50 slots de temps.

Le temps de génération de paquets n'a pas un impact sur le protocole EA-MAC si on compare avec les résultats de simulation présentés dans la figure 4.2.a

3 RF Multichannel-MAC

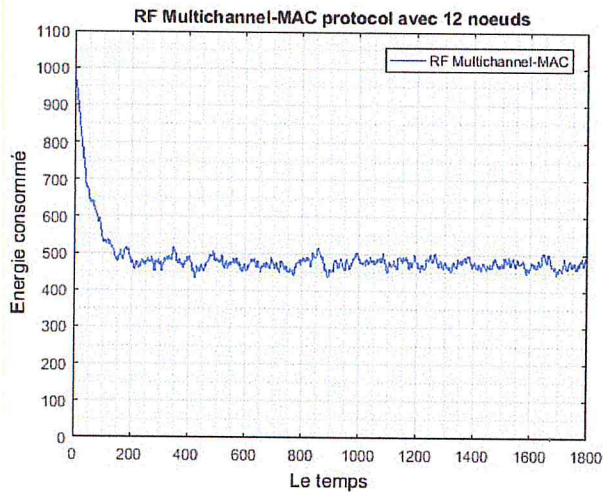


FIGURE 4.3.a: La moyenne de consommation d'énergie du protocole RF Multichannel-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic dense.

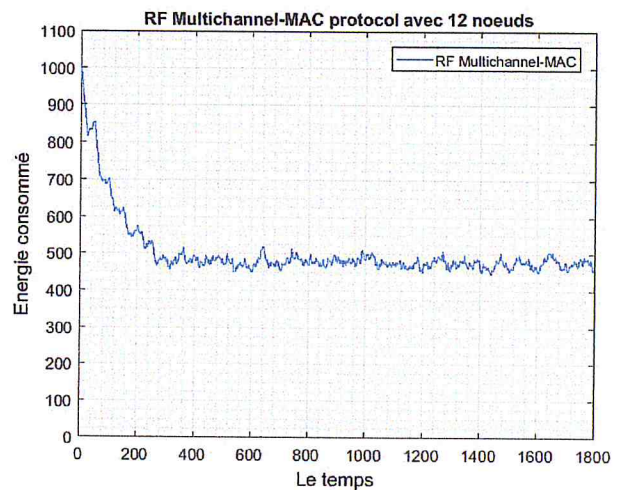


FIGURE 4.3.b: La moyenne de consommation d'énergie du protocole RF Multichannel-MAC dans un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic léger.

La figure 4.3.a représente les résultats de simulation du protocole RF Multichannel-MAC avec 12 nœuds et la génération de paquets chaque 50 slot de temps.

On remarque qu'à partir de 260 slot de temps la consommation d'énergie de ce protocole varie entre 450J et 520J.

La figure 4.3.b représente les résultats de simulation du protocole RF Multichannel-MAC avec 12 nœuds et la génération de paquets chaque 15 slot de temps.

On a essayé d'augmenter le nombre de génération de paquets (120 générations) et on a remarqué que ce protocole donne toujours de bons résultats.

Ce qui nous a permis de déduire que RF Multichannel-MAC est performant si on travaille dans un grand réseau (12 nœuds) comme dans le cadre des applications sur les villes intelligentes.

4 Polling-MAC, EA-MAC et RF Multichannel-MAC

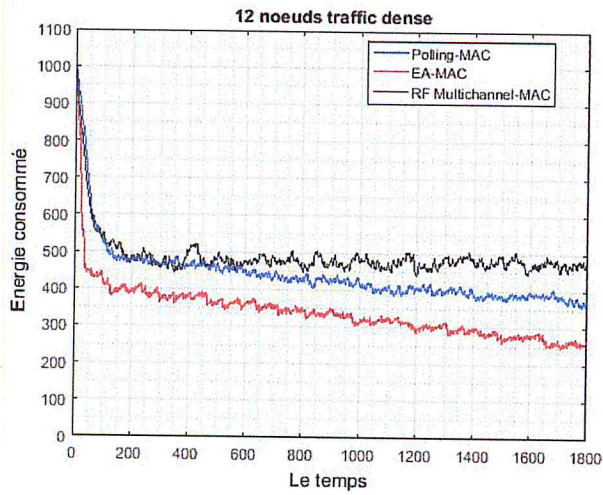


FIGURE 4.4: La moyenne de consommation d'énergie des 03 protocoles avec 12 nœuds (génération de paquets chaque 50 slot de temps).

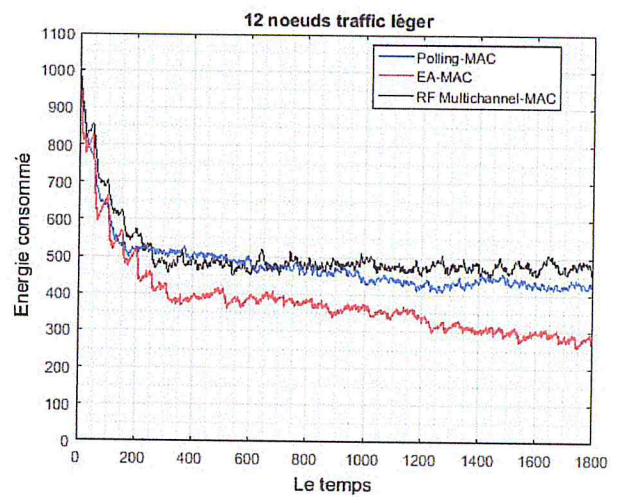


FIGURE 4.5: La moyenne de consommation d'énergie des 03 protocoles avec 12 nœuds (génération de paquets chaque 15 slot de temps).

A partir de 800 slot de temps le protocole RF Multichannel-MAC se montre le plus performant, et se stabilise, contrairement aux deux autres protocoles qui perdent leurs efficacités avec le temps.

3 Scénario 2 (06 nœuds)

Dans cette partie on présentera les résultats de simulations avec un réseau de 06 nœuds en utilisant les mêmes paramètres présentés dans le tableau 4.1.

1 Polling-MAC

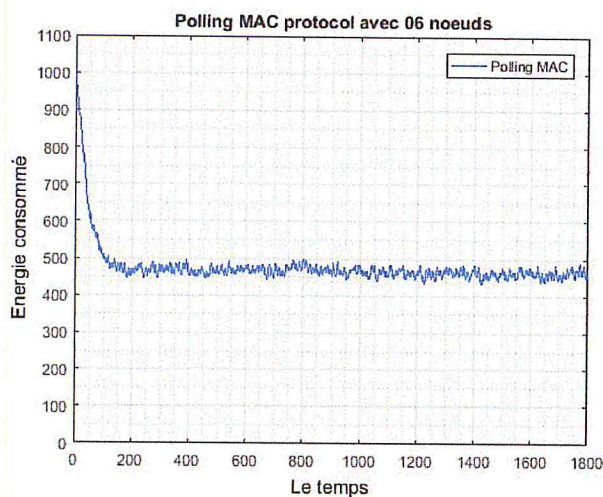


FIGURE 4.6.a: La moyenne de consommation d'énergie du protocole Polling-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic dense.

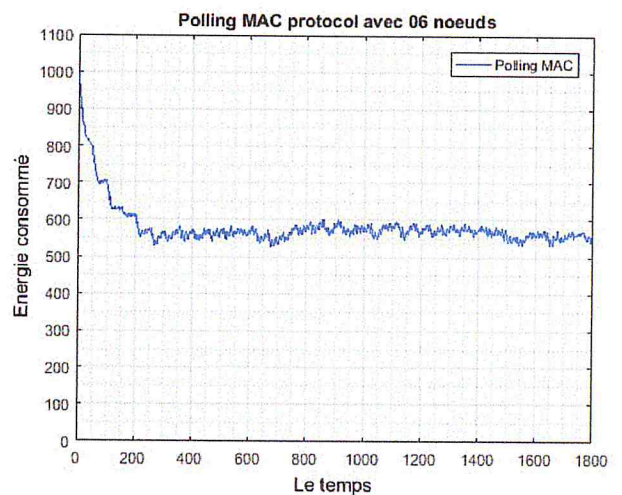


FIGURE 4.6.b: La moyenne de consommation d'énergie du protocole Polling-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic léger.

La figure 4.6.a présente les résultats de simulations du protocole Polling-MAC avec 06 nœuds et la génération de paquets chaque 15 slot de temps.

D'après ces résultats on remarque que la consommation d'énergie est en dessous du seuil à partir du 600 slot de temps mais elle reste toujours stable autour de 450J.

Comparant avec les résultats précédents Polling-MAC reste bien performant dans un petit réseau. La figure 4.6.b présente les résultats de simulations du protocole Polling-MAC avec 06 nœuds et la génération de paquets chaque 50 slot de temps.

D'après ces résultats la taille du réseau a un grand impact sur ce protocole puisque la consommation d'énergie n'a jamais été en dessous du seuil. Ce qui rend ce protocole très performant dans un petit réseau (ex : Les maisons intelligentes).

2 EA-MAC

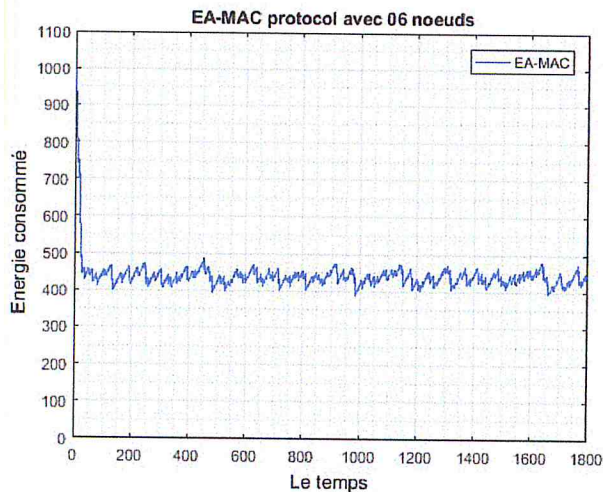


FIGURE 4.7.a: La moyenne de consommation d'énergie du protocole EA-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic dense.

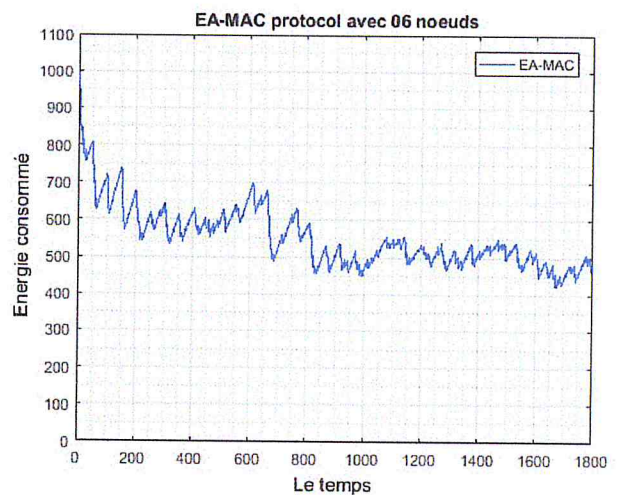


FIGURE 4.7.b: La moyenne de consommation d'énergie du protocole EA-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic léger.

La figure 4.7.a présente les résultats de simulations du protocole EA-MAC avec 06 nœuds et la génération de paquets chaque 15 slot de temps.

D'après ces résultats on remarque que la performance de EA-MAC c'est améliorer dans un petit réseau, sa consommation d'énergie reste toujours stable.

La figure 4.7.b présente les résultats de simulations du protocole EA-MAC avec 06 nœuds et la génération de paquets chaque 50 slot de temps.

On a prolongé la durée de génération de paquets, nous remarquons que EA-MAC s'améliore et on en déduit que le protocole reste très performant dans les petits réseaux a trafic léger

3 RF Multichannel-MAC

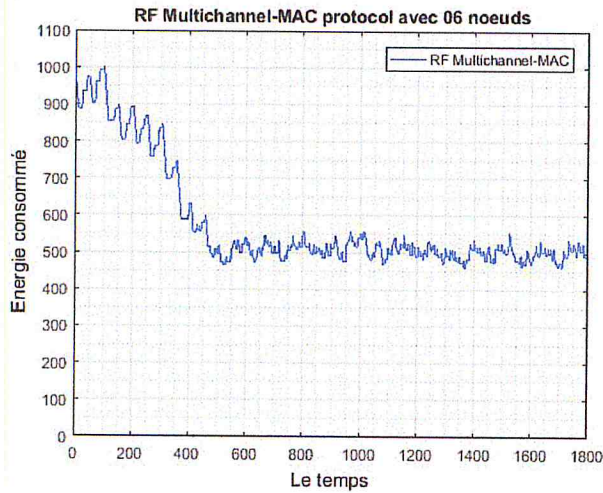


FIGURE 4.8.a: La moyenne de consommation d'énergie du protocole RF Multichannel-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic léger.

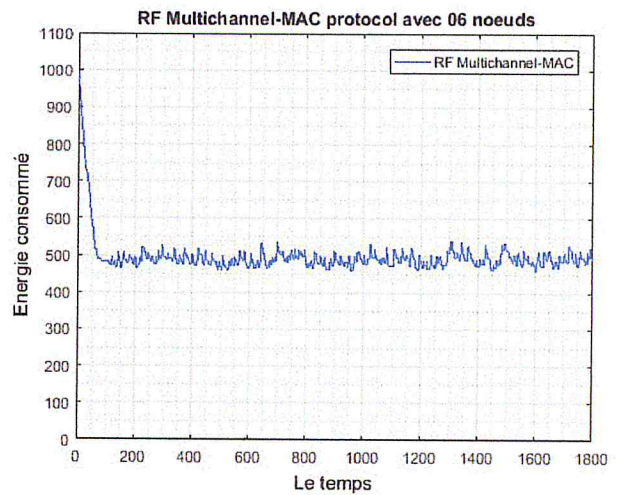


FIGURE 4.8.b: La moyenne de consommation d'énergie du protocole RF Multichannel-MAC dans un réseau de 06 nœuds dans le cadre d'un trafic dense.

La figure 4.8.a présente les résultats de simulations du protocole RF Multichannel-MAC avec 06 nœuds et la génération de paquets chaque 50 slot de temps.

La taille du réseau n'a pas un impact sur ce protocole il est bien dans un grand ou un petit réseau.

La figure 4.8.b présente les résultats de simulations du protocole RF Multichannel-MAC avec 06 nœuds et la génération de paquets chaque 15 slot de temps.

Nous remarquons que la densité du trafic n'a pas d'impact sur la performance du réseau.

4 Polling-MAC, EA-MAC, RF Multichannel-MAC

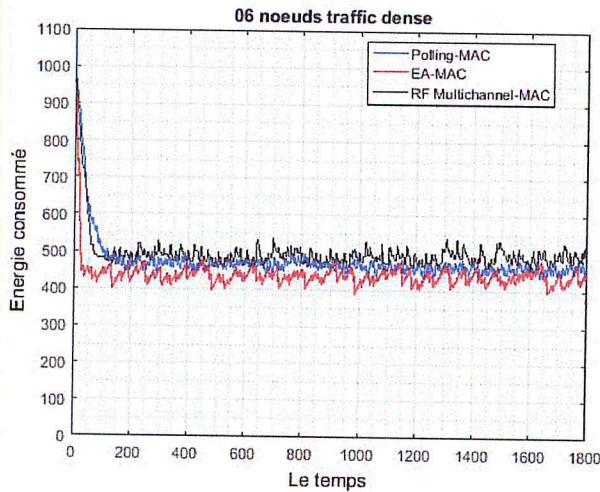


FIGURE 4.9: La moyenne de consommation d'énergie des 03 protocoles avec 06 nœuds (génération de paquets chaque 15 slot de temps).

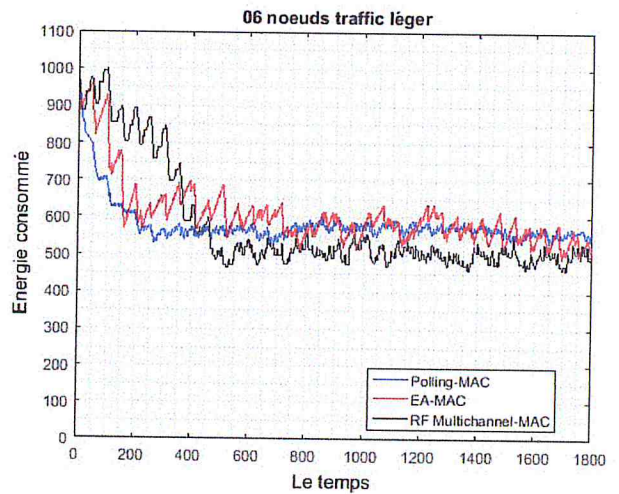


FIGURE 4.10: La moyenne de consommation d'énergie des 03 protocoles avec 06 nœuds (génération de paquets chaque 50 slot de temps).

Lors d'un trafic dense, on remarque que RF Mutlichannel-MAC est meilleur, par contre dans les réseaux a densité faible, polling-MAC est le plus performant.

4 Qualité de Service

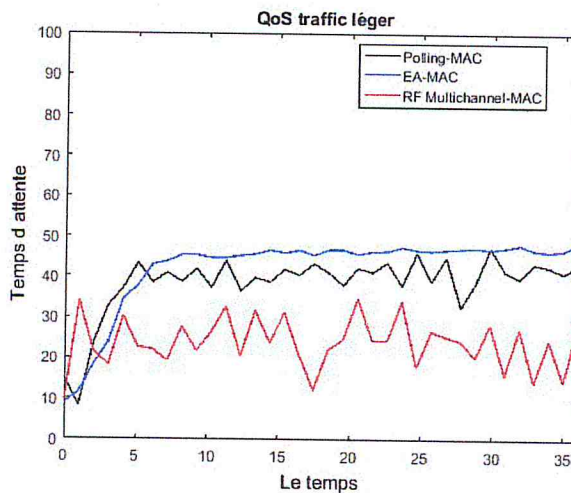


FIGURE 4.11: Qualité de service dans le cadre d'un trafic léger.

En termes de qualité de service on remarque que RF-MAC est meilleur par rapport aux deux autres protocoles, le temps entre la génération et l'envoi du paquet est petit grâce à la préemption qu'offre ce dernier.

Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons implémenté et simulé trois protocoles MAC sous Matlab afin d'étudier l'impact des paramètres de simulation sur les performances du réseau.

Nous avons simulé deux scénarios, dans chaque scénario nous avons étudié le comportement du réseau par rapport à la densité du trafic.

et finalement nous avons présenté la qualité de service pour un réseau de 12 nœuds dans le cadre d'un trafic léger.

Nous concluons que RF Multichannel-MAC est un protocole très performant lorsqu'il s'agit d'un grand réseau à trafic dense ou léger

Conclusion générale

La recherche dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil est en train de vivre une révolution importante, ouvrant des perspectives d'impacts significatifs dans de nombreux domaines. Ils se caractérisent par une capacité énergétique limitée. Ainsi, l'optimisation de la consommation d'énergie pour de tels réseaux devient une tâche importante pour la prolongation de la durée de vie de ces derniers.

L'étude réalisée au cours de ce mémoire porte sur deux volets principaux, le premier volet comporte une étude théorique sur les différents travaux proposés dans la littérature, ou nous avons eu l'occasion d'approfondir nos connaissances dans le nouveau domaine des réseaux de capteurs sans fil qui constitue l'une des dix nouvelles technologies qui bouleverseront le monde et notre manière de vivre et de travailler.

Le deuxième consistait à analyser grâce à une étude comparative à plusieurs critères les principaux protocoles MAC destinés aux RCSF.

Nous avons pu découvrir et manipuler le simulateur Matlab R2016a qui est aussi convoité, dans différents domaines.

Nos Simulations montrent que chaque protocole peut être très performant en l'utilisant dans les applications adéquates. Certains sont très performant dans des petits réseaux/trafic dense alors que d'autres non. Nous concluons d'une manière générale que nos méthodes proposées au CERIST surpassent les autres méthodes en termes de durée de vie moyenne.

Perspectives

Les propositions présentées peuvent être améliorées suivant plusieurs directions possibles.

Une prolongation de ce travail peut être faite en fournissant une nouvelle stratégie d'allocation optimale pour le rechargement et la transmission, en temps réel. Le but est de maximiser la durée de vie du réseau sous différentes architectures.

Une étude comparative avec les protocoles proposés dans les réseaux utilisant les radios intelligents sera aussi un plus. Malgré la fiabilité et la performance de ces derniers, ils restent très coûteux par rapports au réseaux muni de radio classique.

Bibliographie

- [1] Alex Mouapi. *Conception et réalisation d'une alimentation autonome pour un réseau de capteurs sans fil appliqué dans les transports ferroviaires*. PhD thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2015.
- [2] Mathieu Badet and Willy Bonneau. Mise en place d'une plateforme de test et d'expérimentation. *mémoire de Master*, 2006.
- [3] Yacine Challal. Réseaux de capteurs sans fil. *University of Technology in compiegne, France*, 2008.
- [4] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE communications magazine*, 40(8) :102–114, 2002.
- [5] B Khalifa. La sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil. In *conférence à l'université de Bechar*, volume 84, page 85, 2006.
- [6] Lan F Akyildiz, Weilian Su, and Yogesh Sankarasubramaniam. Erdal cayirci georgia institute of technology,“. *A Survey on Sensor Networks” Journal of Computer Networks*, 38 :393–422, 2002.
- [7] Mohamed Amine Kafi, Yacine Challal, Djamel Djenouri, Messaoud Doudou, Abdelmadjid Bouabdallah, and Nadjib Badache. A study of wireless sensor networks for urban traffic monitoring : applications and architectures. *Procedia computer science*, 19 :617–626, 2013.
- [8] Shu Yinbiao, Kang Lee, Peter Lanctot, Fan Jianbin, Hu Hao, Bruce Chow, and Jean-Pierre Desbenoit. Internet of things : wireless sensor networks. *White Paper, International Electro-technical Commission*, <http://www.iec.ch>, page 11, 2014.
- [9] Holger Karl and Andreas Willig. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2007.

- [10] Miloud Baga, Mohamed Younis, Djamel Djenouri, Abdelouahid Derhab, and Nadjib Badache. Distributed low-latency data aggregation scheduling in wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 11(3) :49, 2015.
- [11] MOAD Sofiane and Nizar Bouabdallah. La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. *Rapport de recherche, Institut De formation supérieure en informatique et communication IFSIC, Rennes*, 2008.
- [12] Nanhao Zhu. *Simulation and optimization of energy consumption in wireless sensor networks*. PhD thesis, Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2013.
- [13] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 38(4) :393–422, 2002.
- [14] Bernard Semigabo Lwakabamba. *Performance analysis experiments for the wireless sensor networks integrated into the C6 virtual reality environment*. PhD thesis, Citeseer, 2004.
- [15] Holger Karl. A short survey of wireless sensor networks holger karl, andreas willig.
- [16] Ilker Demirkol, Cem Ersoy, Fatih Alagoz, et al. Mac protocols for wireless sensor networks : a survey. *IEEE Communications Magazine*, 44(4) :115–121, 2006.
- [17] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *System sciences, 2000. Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on*, pages 10–pp. IEEE, 2000.
- [18] Ayad Salhieh, Jennifer Weinmann, Manish Kochhal, and Loren Schwiebert. Power efficient topologies for wireless sensor networks. In *Parallel Processing, 2001. International Conference on*, pages 156–163. IEEE, 2001.
- [19] Mohammad Ilyas and Imad Mahgoub. *Handbook of sensor networks : compact wireless and wired sensing systems*. CRC press, 2004.
- [20] Han Namgoong, Dongman Lee, and Dukyun Nam. Energy efficient topology for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, pages 25–33. ACM, 2005.
- [21] K. D. Wong. Physical layer considerations for wireless sensor networks. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2004*, 2 :1201–1206 Vol.2, 2004.

- [22] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, 12(3) :493–506, 2004.
- [23] G Pujolle, O Salvatori, and J Nozick. Les réseaux editions 2005. *éditions Eyrolles*, 2005.
- [24] Mustapha Khiati. *Minimisation du delai pour la diffusion globale dans les réseaux de capteurs sans fil utilisant le concept " Duty-cycle*". PhD thesis, 2012.
- [25] Fatima Zahra Djiroun and Djamel Djenouri. Mac protocols with wake-up radio for wireless sensor networks : A review. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1) :587–618, 2017.
- [26] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 95–107. ACM, 2004.
- [27] Affoua Therese Aby. *Réseaux de capteurs sans fil étendus dédiés aux collectes de données environnementales*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2016.
- [28] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1567–1576. IEEE, 2002.
- [29] Pei Huang, Li Xiao, Soroor Soltani, Matt W Mutka, and Ning Xi. The evolution of mac protocols in wireless sensor networks : A survey. *IEEE communications surveys & tutorials*, 15(1) :101–120, 2013.
- [30] Umesh Kumar Singh, Kailash Chandra Phuleriya, and Lokesh Laddhani. Study and analysis of mac protocols design approach for wireless sensor networks. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2, 2012.
- [31] Injong Rhee, Ajit Warriar, Mahesh Aia, Jeongki Min, and Mihail L Sichitiu. Z-mac : a hybrid mac for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 16(3) :511–524, 2008.
- [32] Rana Diab. *HMC-MAC : un protocole MAC hybride et multi-canal pour les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2015.

- [33] Issam Abed. *Modélisation et optimisation d'un récupérateur d'énergie vibratoire électromagnétique non-linéaire multimodale*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2016.
- [34] Pr Mohammed Benmohammed. *Optimisation d'énergie dans les algorithmes de routage pour réseaux mobile*. PhD thesis, Université de Batna, 2013.
- [35] Murugavel Raju and Mark Grazier. Energy harvesting. *ULP meets energy harvesting : A gamechanging combination for design engineers Texas Instruments Inc., White paper*, 2008.
- [36] Sujesha Sudevalayam and Purushottam Kulkarni. Energy harvesting sensor nodes : Survey and implications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(3) :443–461, 2011.
- [37] Ramandeep Kaur. Energy efficient approach for solar energy harvesting in wireless sensor network. 2014.
- [38] Dhaou Bouchouicha. *Etude de faisabilité de la récupération d'énergie électromagnétique ambiante*. PhD thesis, Tours, 2010.
- [39] Yasser Ammar. *Conception de systèmes de gestion d'énergie pour microsystèmes autonomes*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2007.
- [40] Marianne Lossec. *Systèmes multisources de récupération d'énergie dans l'environnement humain : modélisation et optimisation du dimensionnement*. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2011.
- [41] Yasser Ammar, Aurélien Buhrig, Marcin Marzencki, Benoît Charlot, Skandar Basrou, Karine Matou, and Marc Renaudin. Wireless sensor network node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro power generator. In *Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence : innovative context-aware services : usages and technologies*, pages 287–292. ACM, 2005.
- [42] Joseph A Paradiso. Systems for human-powered mobile computing. In *Proceedings of the 43rd annual Design Automation Conference*, pages 645–650. ACM, 2006.
- [43] James F Antaki, Gina E Bertocci, Elizabeth C Green, Ahmed Nadeem, Thomas Rintoul, Robert L Kormos, and Bartley P Griffith. A gait-powered autologous battery charging system for artificial organs. *ASAIO journal (American Society for Artificial Internal Organs : 1992)*, 41(3) :M588–95, 1995.

- [44] Xiao Lu, Ping Wang, Dusit Niyato, Dong In Kim, and Zhu Han. Wireless networks with rf energy harvesting : A contemporary survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(2) :757–789, 2015.
- [45] Constantine A Balanis. *Antenna theory : Analysis & design*, John Wiley & Sons, Inc. Publication, 1997.
- [46] Theodore S Rappaport et al. *Wireless communications : principles and practice*, volume 2. Prentice Hall PTR New Jersey, 1996.
- [47] Ian Flint, Xiao Lu, Nicolas Privault, Dusit Niyato, and Ping Wang. Performance analysis of ambient rf energy harvesting : A stochastic geometry approach. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014 IEEE*, pages 1448–1453. IEEE, 2014.
- [48] Xiaoyu Zhang, Hanjun Jiang, Lingwei Zhang, Chun Zhang, Zhihua Wang, and Xinkai Chen. An energy-efficient ASIC for wireless body sensor networks in medical applications. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, 4(1) :11–18, 2010.
- [49] Norberto Barroca, Henrique M Saraiva, Paulo T Gouveia, Jorge Tavares, Luis M Borges, Fernando J Velez, Caroline Loss, Rita Salvado, Pedro Pinho, Ricardo Goncalves, et al. Antennas and circuits for ambient rf energy harvesting in wireless body area networks. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium on*, pages 532–537. IEEE, 2013.
- [50] Yanjun Zuo. Survivable RFID systems : Issues, challenges, and techniques. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 40(4) :406–418, 2010.
- [51] Lingli Xia, Jiao Cheng, Neil E Glover, and Patrick Chiang. 0.56 V, -20 dBm RF-powered, multi-node wireless body area network system-on-a-chip with harvesting-efficiency tracking loop. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 49(6) :1345–1355, 2014.
- [52] Xun Zhou, Rui Zhang, and Chin Keong Ho. Wireless information and power transfer : Architecture design and rate-energy tradeoff. *IEEE Transactions on Communications*, 61(11) :4754–4767, 2013.
- [53] Jaeho Kim and Jang-Won Lee. Energy adaptive MAC protocol for wireless sensor networks with RF energy transfer. In *Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2011 Third International Conference on*, pages 89–94. IEEE, 2011.

- [54] Jianliang Zheng and Myung J Lee. A comprehensive performance study of iee 802.15. 4. *Sensor network operations*, 4 :218–237, 2006.
- [55] Jaeho Kim and Jang-Won Lee. Energy adaptive mac for wireless sensor networks with rf energy transfer : algorithm, analysis, and implementation. *Telecommunication Systems*, 64(2) :293–307, 2017.
- [56] M Yousof Naderi, Prusayon Nintanavongsa, and Kaushik R Chowdhury. Rf-mac : A medium access control protocol for re-chargeable sensor networks powered by wireless energy harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(7) :3926–3937, 2014.
- [57] Mohammad Shahnoor Islam Khan, Jelena Mišić, and Vojislav B Mišić. Zoning and relaying-based mac protocol with rf recharging. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(2) :1835–1844, 2017.
- [58] Mohammad Shahnoor Islam Khan, Jelena Mišić, and Vojislav B Mišić. Mac protocol for wireless sensor networks with on-demand rf recharging of sensor nodes. In *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2015 International Conference on*, pages 541–545. IEEE, 2015.

Glossaire

Terminal caché ce problème se produit lorsque plusieurs nœuds qui ne sont pas à portée les uns des autres transmettent des trames de données vers le même récepteur. Considérons le scénario de la figure 1. Le nœud C n'est pas à portée du nœud A et donc ne peut pas détecter l'activité de A. Lorsque le nœud C teste le canal afin de transmettre une trame au nœud B, il détecte que le médium est libre pendant que A est en train de communiquer avec B. Par conséquent, une collision se produit au niveau du nœud B.

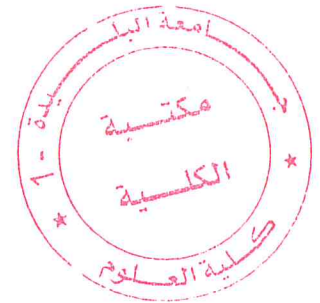
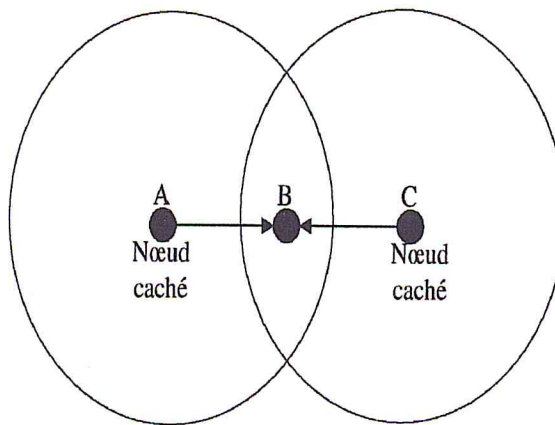


FIGURE 1 : Exemple de terminal caché.

Data Logger est un dispositif automatique, voire programmable qui enregistre des valeurs de mesures individuelles et des séries de mesures sur une longue période (pouvant couvrir plusieurs mois). Les grandeurs sont automatiquement mesurées, souvent numérisées et enregistrées sur un support. Elles peuvent être transmises par le biais d'une interface à un afficheur, à un PC muni d'un logiciel (pour une visualisation et analyse), une imprimante, ou un téléphone intelligent.

QoS la qualité de service « QoS », ou « QoS » elle correspond à la performance globale d'un réseau, qu'il soit téléphonique ou informatique, perçue par les utilisateurs du réseau. Ce concept est très important pour le transport des trafics ayant des besoins spécifiques. En effet, dans les réseaux à ressources partagées (p. ex. Internet, RCSF ...), il est important d'offrir un service différencié permettant de gérer les ressources de manière optimisée en favorisant les trafics ayant des besoins spéciaux par rapport aux autres trafics qui tolèrent un niveau de qualité de service minimal.