



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE IBN KHALDOUN - TIARET

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTÉ MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par :

MAIZI Ibtissam

Sur le thème

Simulation des protocoles MAC dans les réseaux de capteurs sans fil

Soutenu publiquement le .. / .. / 2019 à Tiaret devant le jury composé de :

Mr BEKKAR Khaled

Grade Université Xxxxxx

Président

Mr BENGHENI Abdelmalek

Grade Université Xxxxxx

Encadreur

Mr NASSANE Samir

Grade Université Xxxxxx

Examineur

Remerciements

«Louange à Allah qui nous a guidés à ceci. Nous n'aurions pas été guidés, si Allah ne nous avait pas guidés ».

[Sourate 7. Al Araf verset 43]

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à **Monsieur BEKKAR Khaled** pour avoir accepté de présider le jury.*

*Ma reconnaissance, et mes sincères remerciements vont à **Monsieur BENGHANI Abdelmalek** pour m'avoir dirigé tout au long de la réalisation de ce travail. Ses orientations, ses encouragements, sa compréhension, sa disponibilité constante m'ont été d'une précieuse aide.*

*Je tiens à remercier également **Monsieur NASSANE Samir** pour avoir accepté d'examiner ce travail et l'enrichir par ses propositions.*

Et enfin, mes sincères remerciements et respects vont aux enseignants qui m'ont enseignés et qui par leurs compétences m'ont soutenu dans la poursuite de mes études.

Dédicace

*J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à **mes parents**, merci pour les sacrifices que vous avez consentis et les appuis que vous m'avez donné tout au long de mon cursus et pour la confiance que vous m'avez accordée.*

*Toute ma gratitude à mes deux sœurs **Amina et Nadjet** et à mon confident **Toufik**, support quotidien, support émotionnel, support moral, mais avant tout, support inconditionnel de ma vie...*

*A mon cousin **Abdelkader** et ma nièce adorée **Amira**.*

A mes camarades et mes amies.

Ibtissem

Table des matières

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction	10
1. Contexte	10
2. Problématique	10
3. Objectif	11
4. Plan du mémoire	11

Première partie: Synthèse bibliographique

<u>Chapitre 1: Généralités sur les RCSF</u>	14
1. Introduction	15
2. Les réseaux de capteurs sans fil	15
2.1. Un nœud capteur	15
2.1.1. Définition	15
2.1.2. Architecture d'un capteur	16
2.2. Définition d'un RCSF	17
2.3. Architecture d'un RCSF	18
2.4. Caractéristiques des RCSF	18
2.5. Pile protocolaire des RCSF.....	19
2.5.1. Les différents plans de gestion	20
2.5.2. Les différentes couches utilisées	21
2.6. Domaines d'application des RCSF.....	22
2.7. Contraintes d'application	24
3. Quelques notions	26
3.1. Durée de vie	26
3.2. Connectivité	26
3.3. Couverture	27
4. Consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs	27
5. Conclusion	28

Chapitre 2: Protocole MAC pour les RCSF	29
1. Introduction.....	30
2. Couche MAC	30
2.1. Définition	30
2.2. Fonctionnalités	31
3. Caractéristiques d'un protocole MAC convenable aux RCSF	31
4. Classification des techniques de conservation énergétique	32
4.1. Technique basée sur le « duty cycle »	33
4.2. Technique basée sur le TDMA	33
4.3. Techniques hybrides	34
5. Protocoles MAC à « duty cycle »	34
5.1. Mode synchrone	34
5.1.1. Protocole S-MAC	34
5.1.2. Protocole T-MAC	35
5.2. Mode asynchrone	36
5.2.1. Protocole B-MAC	36
5.2.2. Protocole X-MAC	38
5.3. Protocoles hybrides	39
5.3.1. Protocole Z-MAC	39
6. Conclusion	39

Deuxième partie: Implémentation

Chapitre 1: Présentation de notre proposition	42
1. Introduction	43
2. Objectif	43
3. Vue d'ensemble de notre proposition	43
4. Présentation du protocole IB-MAC	45
5. Fonctionnement du protocole IB-MAC	45
6. Déroulement du protocole IB-MAC	46

7. Organigramme de fonctionnement	49
8. Conclusion	50
Chapitre 2: Simulation du protocole IB-MAC	51
1. Introduction	52
2. Présentation de l'environnement de développement	52
2.1. OMNeT++	52
2.2. Mixim	53
3. Architecture d'OMNeT++	54
4. Simulation	55
4.1. Paramètres de simulation	55
5. Métriques d'évaluation des performances	55
5.1. Consommation d'énergie moyenne	55
6. Conclusion	56
Conclusion	57
Bibliographie	
Références bibliographiques	

Liste des figures

Figure 1.1: Architecture d'un nœud capteur	16
Figure 1.2: Architecture d'un réseau de capteur	18
Figure 1.3: La pile protocolaire des réseaux de capteurs	20
Figure 1.4: Les domaines d'application des réseaux de capteurs	24
Figure 2.1: Les techniques de conservation d'énergie dans les RCSF	33
Figure 2.2: Fonctionnement du protocole B-MAC	37
Figure 2.3: Fonctionnement du protocole X-MAC	38
Figure 3.1: Fonctionnement détaillé du protocole B-MAC	44
Figure 3.2: L'état initial dans le protocole IB-MAC	46
Figure 3.3: L'écoute du canal dans le protocole IB-MAC	47
Figure 3.4: L'attente et l'envoi des données dans le protocole IB-MAC	47
Figure 3.5: La réception des données	48
Figure 4.1: Logo d'OMNeT	53
Figure 4.2: La version d'OMNeT utilisée	53
Figure 4.3: La pile protocolaire d'un nœud	54
Figure 4.4: Déploiement des nœuds	54
Figure 4.5: La consommation d'énergie dans les RCSF.....	56

Liste des abréviations

WSN: Wireless Sensor Networks

ADC: Analog to Digital Converter

QoS : Qualité de service

RCSF : Réseau de capteurs sans fil

MAC: Medium Access Control

Min: minimum

Max: maximum

GSM: Global System for Mobile Communications

WLAN: Wireless Local Area Network

CDMA: Code division multiple access

TDMA: time division multiple access

CA: Collision Avoidance

CRC: Cyclic Redundancy Check

OSI: Open System Interconnection

S-MAC: Sensor-MAC

T-MAC: timeout MAC

B-MAC: Berkeley MAC

X-MAC : A Short Preamble MAC

TX : Phase de transmission

ACK: Acquittement

LPL: Low Power Listening

CCA: Clear Channel Assessment

OMNET: Objective Modular Network Tested

Introduction

1. Contexte

Depuis leur création, les réseaux sans fil ne cessent de connaître un succès croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Grâce à leurs divers avantages, cette technologie a pu s’instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux de communication actuels. En effet, grâce à leur support de transmission qui est le média hertzien, ces réseaux présentent plusieurs avantages qui sont entre autres le coût réduit des équipements, la facilité d’installation et l’ubiquité de l’information. Au cours de leurs évolutions, les réseaux sans fil ont donné naissance à diverses architectures telles que les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fil, les réseaux Ad hoc, ...etc.

Les progrès récents dans ce domaine ont conduit à la mise en œuvre d’une nouvelle technologie nommée réseaux de capteurs, Cette technologie est basée sur des petits dispositifs appelés nœuds capteurs, qui peuvent être placés presque dans n’importe quel endroit. Ce type de réseau est né de la fusion entre les systèmes embarqués et les communications sans fil. Un RCSF (“*Wireless Sensor Network*” en Anglais) est un réseau Ad hoc composé d’un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs communicant via des liaisons sans fil par des ondes radioélectriques de façon autonome. Ces nœuds encore appelés capteurs sont capables de récolter plusieurs paramètres sur l’environnement qui les entoure, appelé généralement zone de captage ou zone de surveillance. Ensuite, ils doivent si nécessaire traiter les données capturées et les transmettre à un ou plusieurs nœuds de collecte appelés station de base, collecteurs, centres de traitements (ou “*sink*” en Anglais).

2. Problématique

Toutefois, ces réseaux de capteurs sans fil ne sont pas parfaits. En effet, compte tenu de leur petite taille, leur faible coût et leurs déploiement dans des zones souvent hostiles ou difficiles d’accès, les nœuds capteurs présentent un certain nombre de faiblesses parmi lesquelles une durée de vie du réseau limitée, une bande passante faible, des capacités de capture et de communication réduites, ...etc. Afin de surmonter ces contraintes des RCSF, plusieurs problématiques de recherche sont nées ces dernières années, et les principales portent sur l’optimisation de la consommation énergétique en vue d’améliorer la durée de vie du réseau. Ce qui nous a poussés à nous interroger :

Comment pourrait-on faire pour optimiser la consommation d'énergie des nœuds capteurs tout en garantissant le bon fonctionnement du réseau ?

3. Objectif

Nous avons mené cette recherche dans le but d'essayer d'améliorer la durée de vie d'un capteur. Pour ce faire nous nous sommes intéressés au protocole B-MAC de la couche MAC.

Le but de notre travail consiste en une amélioration du protocole B-MAC qui est un protocole asynchrone basée sur la technique à « duty cycle » et l'implémentation de ce dernier sur l'environnement de simulation OMNeT++. Pour ce faire nous formulons deux hypothèses qui sont les suivantes :

- Notre travail permettrait de résoudre le problème de la sur-écoute causer par l'envoi du long préambule.
- Le protocole devrait être capable d'éviter les collisions pour une meilleure communication entre les nœuds.

4. Plan du mémoire

Notre mémoire est divisé en deux parties :

- Première partie : elle représente une synthèse bibliographique, elle est composée en deux chapitres :
 - Le premier chapitre intitulé " Généralités sur les RCSF " représente des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil.
 - Le deuxième chapitre "Protocoles MAC pour les RCSF " est chargé de définir la couche MAC, ses fonctionnalités et ses protocoles tout en détaillant la technique à « duty cycle ».
- Deuxième partie : Dans cette partie est chargée de présenter notre travail, elle est divisée en deux chapitres :
 - Le troisième chapitre nommé "Présentation de notre proposition" expose notre travail.
 - Le quatrième chapitre "Simulation du protocole IB-MAC" sera consacré pour

la présentation de l'environnement de simulation OMNeT++ ainsi qu'à l'exposition des résultats de la simulation

Nous clôturons notre travail par une conclusion et quelques perspectives dans le domaine en question.

Première partie :

Synthèse bibliographique

Chapitre **1**

Généralités sur les RCSF

Sommaire

1. Introduction	15
2. Les réseaux de capteurs sans fil	15
2.1. Un nœud capteur	15
2.2. Définition d'un RCSF	17
2.3. Architecture d'un RCSF	18
2.4. Caractéristiques des RCSF	18
2.5. Pile protocolaire des RCSF.....	19
2.6. Domaines d'application des RCSF	22
2.7. Contraintes d'application	24
3. Quelques notions	26
3.1. Durée de vie	26
3.2. Connectivité	26
3.3. Couverture	27
4. Consommation d'énergie dans les RCSF	27
5. Conclusion	28

1. Introduction

L'intérêt majeur de cette partie réside dans le fait de présenter la technologie des réseaux de capteurs. Nous exposerons tout d'abord la notion de réseau de capteurs, son architecture ainsi que ses caractéristiques.

Ensuite, nous allons parler des contraintes de conception et les domaines d'applications de cette technologie.

Enfin, nous allons définir quelques termes techniques les plus utilisés dans ce domaine.

2. Les réseaux de capteurs sans fil

L'émergence des réseaux sans fil se justifie par le besoin d'avoir de nouvelles perspectives dans le domaine de la télécommunication. Mais qu'est ce qu'un réseau sans fil ? Et comment peut-on le définir ?

Dans le domaine de la télécommunication, le réseau sans fil désigne : « un réseau qui connecte différents systèmes entre eux par des ondes radio. Les réseaux sans fil se sont avant tout développés comme réseaux internes, propres à un bâtiment, soit comme un réseau d'entreprise, soit comme réseau domestique [1] ».

2.1. Un nœud capteur

2.1.1. Définition

Avant toute chose et avant de parler d'un réseau de capteurs nous devons savoir qu'est ce qu'un nœud capteur ?

Plusieurs informaticiens ont pris le souci de clarifier ce terme afin de mieux le comprendre : «Un nœud capteur est un petit appareil autonome capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement, comme la température, la vibration, la pression, etc. Chaque nœud capteur assure trois fonctions principales : la collecte, le traitement(ou pas) et la communication de l'information vers un ou plusieurs points de collecte appelés station de base (SB) via l'utilisation de la communication indirecte (multi saut) ou directe (mono saut)[2]».

2.1.2. Architecture d'un nœud capteur

Nous avons trouvé en ce qui concerne l'architecture d'un nœud capteur sans fil plusieurs schémas qui le décrivent, nous avons opté pour le schéma ci-dessous qui comporte les unités essentielles d'un nœud capteur muni d'une petite explication qui décrit le rôle essentiel de chaque unité : « Un nœud capteur dispose de quatre unités de base : une unité de captage, unité de traitement, unité de transmission, et une unité d'énergie. Il peut contenir également, suivant son domaine d'application, des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation « GPS », ou bien un système générateur d'énergie « cellule solaire ». On peut même trouver des micro-capteurs, un peu plus volumineux, dotés d'un système mobilisateur chargé de déplacer le micro-capteur en cas de nécessité [3] ».

La **Figure 1.1** illustre l'architecture d'un nœud capteur :

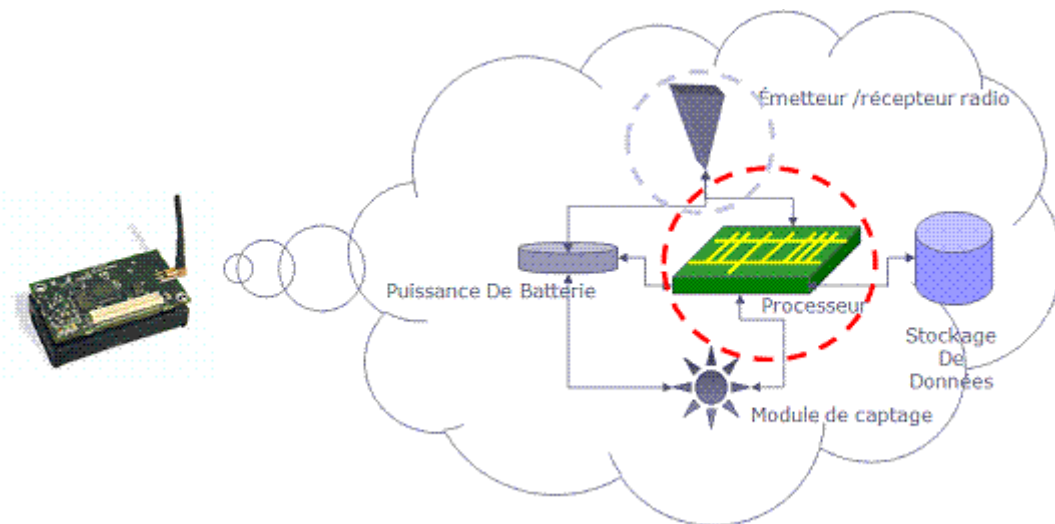


Figure 1.1 : Architecture d'un nœud capteur

Chaque groupe de composants possède son propre rôle [4]:

- **Unité de traitement**

C'est l'unité principale du nœud capteur, généralement un processeur couplé à une mémoire vive. Son rôle est de contrôler le bon fonctionnement des autres unités. Sur certains capteurs elle peut embarquer un système d'exploitation pour faire fonctionner le nœud capteur. Elle peut aussi être couplée à une unité de stockage, qui servira par exemple à y enregistrer les informations transmises par l'unité de capture.

- **Unité de capture**

Elle permet la capture des données, c'est à dire la mesure des grandeurs physiques ou analogiques et leur conversion en données numériques. Elle est composée du capteur lui-même et de l'ADC (Analog to Digital Converter). Le capteur est chargé de récupérer les signaux analogiques qu'il transmet à l'ADC qui a pour rôle de transformer et de communiquer les données analogiques en données numériques compréhensibles pour l'unité de traitement.

- **Unité de communication :**

Elle a pour fonction de transmettre et recevoir l'information. Elle est équipée d'un couple émetteur/récepteur. Elle permet la communication au sein du réseau.

- **Unité d'alimentation**

Élément primordial de l'architecture du nœud capteur, c'est elle qui fournit en énergie toutes les autres unités. Elle correspond le plus souvent à une batterie ou une pile alimentant le capteur, dont les ressources limitées en font une problématique propre à ce type de réseau. La réalisation récente d'unité d'alimentation à base de panneaux solaires tente d'apporter une solution pour prolonger sa durée de vie.

2.2. Définition d'un RCSF

Maintenant qu'on a découvert qu'est ce qu'un nœud capteur sans fil, nous pouvons facilement définir c'est quoi un réseau de capteurs.

Dans le domaine des réseaux sans fil, un réseau de capteurs sans fil désigne : « une collection de nœuds capteurs. Les nœuds de ces réseaux consistent en un grand nombre de capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome, dispersés aléatoirement à travers une zone géographique « champ de captage » et mettant en œuvre un routage multi saut jusqu'au nœud considéré comme un « point de collecte ». Les réseaux sans fil de capteurs se composent de nœuds de capteurs qui doivent coopérer à l'exécution d'une fonction spécifique. En particulier, avec la capacité des nœuds de sentir, traiter et communiquer les données, elles sont bien convenues pour exécuter la détection d'événement, qui est clairement une application en avant des réseaux sans fil de capteurs [5]».

2.3. Architecture d'un RCSF

Un RCSF est composé d'un ensemble de nœuds capteurs, ces nœuds capteurs sont organisés en champs « *sensor fields* ». Chacun de ces nœuds a la capacité de collecter des données et de les transférer au nœud passerelle « *Sink ou puits* » par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts. Le puits transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite à l'ordinateur central « *Gestionnaire de tâches* » pour analyser ces données et prendre des décisions.

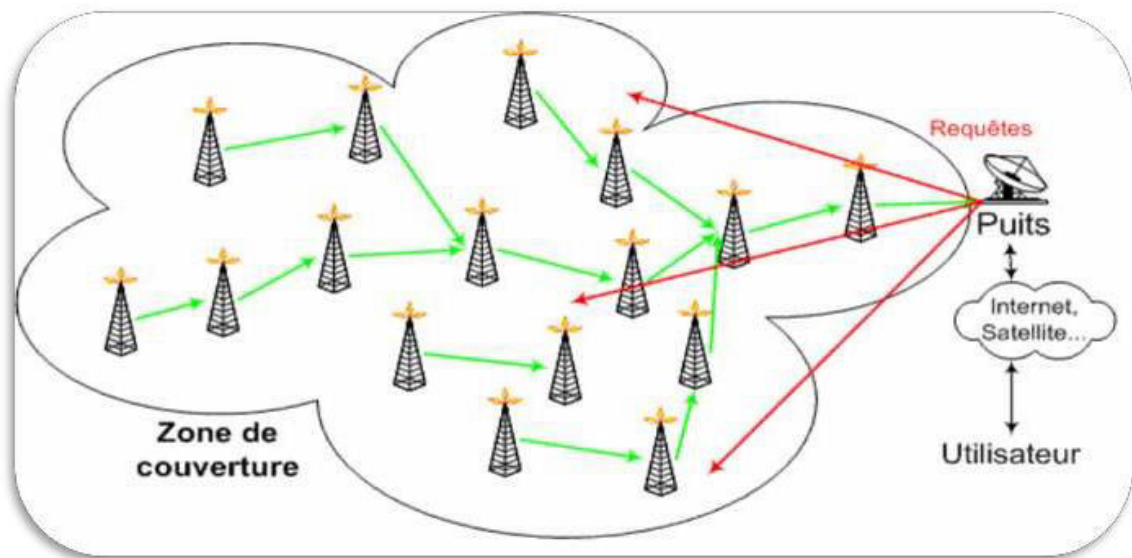


Figure 1.2 : Architecture d'un réseau de capteurs

2.4. Caractéristiques des RCSF

Nous avons pu voir que le domaine des réseaux sans fil est un peu complexe, ce qui nécessite aux chercheurs la connaissance de ses caractéristiques pour une meilleure utilisation et exploitation. Alors, quelles sont les caractéristiques des réseaux de capteurs ?

Un ensemble de caractéristiques sont importantes pour l'accomplissement des tâches assignées aux applications. On en cite [6]:

- **Type de service**

On s'attend à ce que le RCSF offre à l'utilisateur des informations significatives sur l'objet d'intérêt.

- **Qualité de service**

C'est une métrique de la qualité de service qui va être offerte par un RCSF à ses utilisateurs/applications. Le niveau de QoS est défini par un ensemble d'attributs comme le temps d'attente, la largeur de bande, et la perte de paquets qu'on relie directement avec le type de service du réseau.

- **Tolérance aux fautes**

Il est important que le RCSF soit capable de traiter l'échec des nœuds capteurs. Une manière reconnue de satisfaire cette contrainte est de réaliser un déploiement redondant des nœuds capteurs.

- **Scalabilité**

Cette caractéristique traduit la capacité de maintenir la performance indépendamment de la taille du réseau. Comme un grand nombre de nœuds de capteur peuvent être employés dans les applications de RCSF, les architectures et les protocoles doivent fournir le support approprié pour maintenir efficacement les services fournis par le réseau.

- **Maintenance**

Les changements dans l'environnement du réseau, par exemple, l'apparition de nœuds de capteurs avec des batteries épuisées, exigent une solution permettant l'adaptation et le maintien des services du RCSF.

- **Programmation flexible**

C'est la capacité des nœuds de capteur à modifier les options de traitement des données acquises et à effectuer des changements et des ajustements de leurs tâches. ».

2.5. Pile protocolaire des RCSF

Comme tous types de réseaux, les réseaux de capteurs nécessitent une pile protocolaire qui comporte un ensemble de couches, chaque couche a son propre rôle. Alors quel est le rôle de la pile protocolaire ? Et quelles sont les couches utilisées dans le réseau de capteur ?

Le rôle de la pile protocolaire consiste à : « standardiser la communication entre les composants du réseau, afin que les différents constructeurs puissent mettre au point des produits compatibles [7]».

Ainsi, cette pile protocolaire prend en charge le problème de la consommation d'énergie.

Ce modèle utilise cinq couches qui ont les mêmes fonctionnalités que celles du modèle OSI, ainsi que trois plans pour la gestion de la puissance d'énergie, la gestion de la mobilité et la gestion des tâches (interrogation du réseau de capteurs). Le but d'un système en couche est de séparer le problème en différentes parties selon leur niveau d'abstraction. Chaque couche du modèle communique avec une couche adjacente. Chaque couche utilise ainsi les services des couches inférieures, et en fournit à celle de niveau supérieur [8].

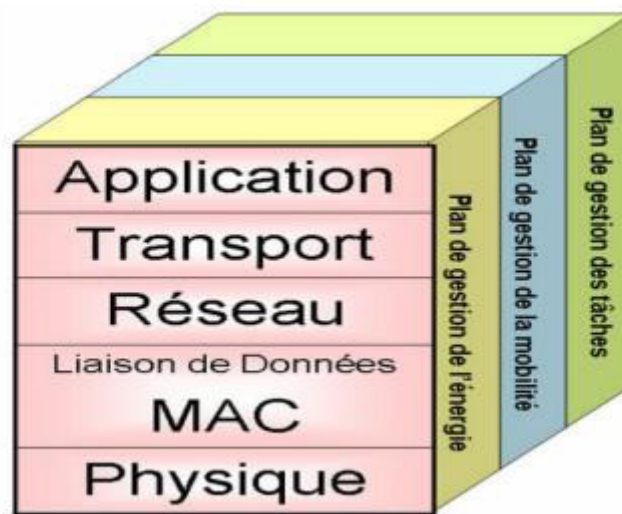


Figure 1.3 : La pile protocolaire des RCSF

2.5.1. Les différents plans de gestion : [9]

- **Plan de gestion d'énergie**

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

- **Plan de gestion de mobilité**

Ce niveau détecte et enregistre tout les mouvements des nœuds capteurs, d'une manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, et maintenir une image récente sur les nœuds voisins, cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie.

- **Plan de gestion des tâches**

Lors d'une opération de capture dans une région donnée, les nœuds composant le réseau ne doivent pas obligatoirement travailler avec le même rythme. Cela dépend essentiellement de la nature du capteur, son niveau d'énergie et la région dans laquelle il a été déployé. Pour cela, le niveau de gestion des tâches assure leur équilibrage et leur distribution sur les différents nœuds du réseau afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau.

2.5.2. Les différentes couches utilisées :

- **Couche physique**

La couche physique est responsable du choix de la fréquence, de la génération de la fréquence porteuse, de la détection du signal, de la modulation et du chiffage des données.

Dans un réseau de capteurs multi-sauts, les nœuds communicants sont liés par un médium sans fil. Ces liens peuvent être constitués par les ondes radio ou des signaux infrarouges.

- **Couche liaison de données**

Beaucoup de recherches dans le domaine des réseaux de capteurs entrent dans le cadre de l'optimisation de la couche de liaison. Elle manipule toutes les issues de communication entre les nœuds voisins. Dans les réseaux sans fil, l'accès au médium commun (la fréquence) doit être contrôlé. Ceci est appelé le contrôle d'accès au Medium (MAC). La tâche principale de cette couche est d'interdire l'accès simultané au canal dans la même marge de fréquence radio. Si un récepteur reçoit deux signaux simultanément, c'est malheureusement une collision qui détruit toute l'information reçue par le récepteur. La plupart des protocoles MAC de la couche liaison tentent d'éliminer entièrement les collisions ou de réduire au minimum la capacité de canal qu'ils exigent.

- **Couche réseau**

Le but principal de la couche réseau est : « l'acheminement des données. Le protocole de routage est le principal acteur dans cette couche, il permet de trouver une route et une transmission performante des données tout en optimisant l'énergie [10] ».

- **La couche transport**

La couche transport est chargée du transport fiable des données et du contrôle de flux. Pour bien mener ces fonctions, elle divise les données issues de la couche application du nœud source en segments avant leur envoi dans le réseau. Du côté du récepteur, ces données issues de la couche réseau sont réordonnées et réassemblées avant d'être envoyées à la couche application. Cette couche peut également gérer les files d'attente des paquets avant leurs transmissions à la couche réseau.

- **La couche application**

Selon les tâches de capture, il existe différents types de logiciels qui peuvent être installés et employés pour la couche application.

2.6. Domaines d'application des RCSF

Après avoir défini un réseau de capteur nous devons savoir que ce dernier est appliqué dans plusieurs domaines, parmi ces domaines nous citons [11] :

- **Application militaire :**

Comme pour de nombreuses autres technologies, le domaine militaire a été le moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Actuellement, les RCSF peuvent être une partie intégrante dans le commandement, le contrôle, la communication, la surveillance, la reconnaissance, etc.

- **Applications environnementales**

Dans ce domaine, les capteurs peuvent être exploités pour détecter les catastrophes naturelles (feux de forêts, tremblements de terre, etc.), détecter des fruits des produits toxiques

(Gaz, produits chimiques, pétrole, ...etc.) dans des sites industriels tels que les centrales nucléaires et les pétrolières. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours.

- **Applications commerciales**

Parmi les domaines dans lesquels les réseaux de capteurs ont aussi prouvé leur utilité, on trouve le domaine commercial. Dans ce secteur, on peut énumérer plusieurs applications comme : la surveillance de l'état du matériel, le contrôle et l'automatisation des processus d'usinage, etc.

- **Applications métier**

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

- **Application médicale**

Les réseaux de capteurs sont également largement répandus dans le domaine médical. Cette classe inclut des applications comme : fournir une interface d'aide pour les handicapés, collecter des informations physiologiques humaines de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de certaines maladies, surveiller en permanence les malades et les médecins à l'intérieur de l'hôpital.

En implantant sous la peau de mini capteurs vidéo, on peut recevoir des images en temps réel d'une partie du corps sans aucune chirurgie pendant environ 24h. On peut ainsi surveiller la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle.

- **Applications à la sécurité**

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure.

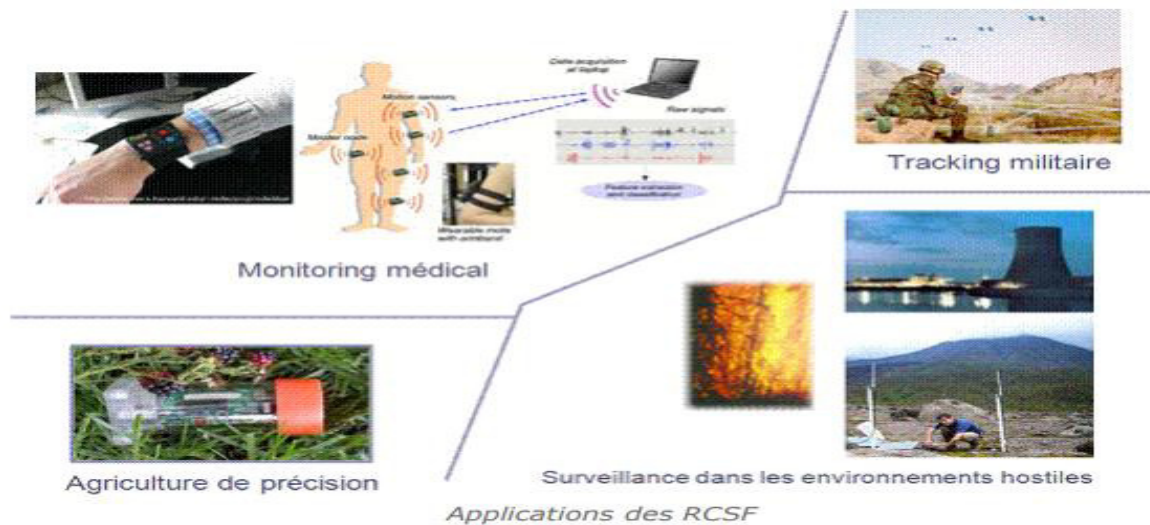


Figure 1.4 : Les domaines d'application des réseaux de capteurs

2.7. Contraintes d'application

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit : [12]

- **Tolérance aux fautes**

Qu'on appelle aussi la fiabilité. C'est la capacité de maintenir les principales fonctions d'un réseau sans aucune interruption causée par des défaillances des nœuds capteurs dans le cas où l'un des nœuds de ce réseau cesse de fonctionner. Ça s'explique comme suit : « Certain nœud peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence. Ces problèmes n'affectent pas le reste du réseau, c'est le principe de la tolérance de fautes. La tolérance de fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs. »

- **Facteur d'échelle :**

Le nombre des nœuds déployés dans n'importe quel environnement peut être très grand ce qui nécessite au « puits ou sink » d'être doté d'une très grande mémoire pour pouvoir stocker les informations reçues.

- **Coûts de production**

Un réseau de capteur est composé d'un ensemble de nœud capteur, le coût total du réseau dépend du coût de chaque nœud. Ce dernier doit être à coût minimum afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel.

- **Environnement**

Les capteurs sont souvent déployés à proximité ou à l'intérieur des endroits à surveiller comme par exemple dans un lieu contaminé biologiquement ou chimiquement, au fond des océans, dans un champ de bataille, sur un animal ou dans une maison, etc. Ces environnements exigent aux capteurs d'avoir de fortes capacités pour pouvoir fonctionner normalement et correctement.

- **Topologie de réseau**

La topologie d'un réseau de capteur change selon le domaine d'application et selon l'environnement sur lequel les nœuds sont déployés, ce qui nécessite une bonne maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases :

- **Le pré-déploiement** : Les capteurs peuvent être éparpillés (manuellement ou par avion) ou placés précisément (manuellement ou par robots).
- **Le post-déploiement** : A cause des pannes, des déplacements de capteurs ou d'obstacles mobiles. La topologie doit parfois être changée après le déploiement.
- **Le redéploiement** : Des nœuds peuvent être déployés dans un deuxième temps pour remplacer ceux tombés en panne ou détruits. Là encore la topologie devra s'adapter.

- **Contraintes matérielles**

La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont que la consommation d'énergie doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible, qu'il s'adapte aux différents environnements (fortes chaleurs, eau ...), qu'il soit autonome et très résistant vu qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles [?].

- **Médias de transmission**

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

- **Consommation d'énergie**

Un nœud capteur étant un appareil micro électronique peut être équipé d'une source d'énergie limitée. Dans quelques applications, la recharge de la batterie est quasiment impossible. Par conséquent, la durée de vie d'un capteur est largement liée à la durée de vie de sa batterie. Les tâches principales d'un nœud capteur se résument dans la détection d'un évènement, traitement des données perçues et leurs transmissions.

3. Quelques notions

Dans le domaine des réseaux sans fil il y a généralement des termes techniques qui sont utilisés d'une manière régulière et que tout informaticien impliqué dans ce domaine est censé les comprendre. Parmi ces termes, il y en a ceux qui sont appropriés aux réseaux de capteurs, nous citons : la durée de vie, la connectivité et la couverture.

Alors qu'est ce qu'une durée de vie ? Qu'est ce qu'une connectivité ? Et qu'est ce qu'une couverture ?

3.1. Durée de vie

« La durée de vie est une métrique d'évaluation de performance très importante dans les RCSF. C'est la durée pendant laquelle le réseau reste opérationnel. On s'attend à ce que le RCSF puisse fonctionner au moins pendant le temps requis pour accomplir la tâche donnée. Néanmoins, la définition de la durée de vie dépend de l'application du RCSF et elle est en relation directe avec le fonctionnement efficace du réseau [13] ».

3.2. Connectivité

« La connectivité est un problème majeur dans les réseaux de capteurs (composés d'entités fixes ou mobiles). Elle dépend essentiellement de l'existence des routes. Elle est affectée pas les changements de topologie dus à la mobilité, la défaillance des nœuds, les attaques, ... etc. Ce qui a pour conséquence : la perte des liens de communication, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, ...etc.

La connectivité dans les RCSF est considérée comme un paramètre de mesure de performance très important surtout dans le cas des applications de RCSF. Ainsi, pour bien garantir toutes les fonctionnalités de telles applications, il est nécessaire de bien étudier et de prendre en compte les propriétés de connectivité lors de la conception et le déploiement de tels réseaux [13] ».

3.3. Couverture

« La couverture dans les RCSF est souvent considérée comme étant une mesure de performance très importante. Elle reflète la façon dont une zone donnée est surveillée (contrôlée), c'est-à-dire comment chaque point de la zone de surveillance est observée et suivie par l'ensemble des nœuds capteurs. Ainsi, la notion de couverture dans les RCSF peut être vue comme une mesure de la QoS.

En effet, certaines applications peuvent exiger un fort degré de couverture afin de remplir pleinement leurs missions. Par exemple, c'est le cas de la surveillance critique de zone, l'agriculture intelligente, etc. Ainsi, pour ces applications, il faut faire en sorte que si un événement se produit en un point quelconque de la zone surveillée par les capteurs, il sera détecté au moins par un capteur donné. Les applications telles que la surveillance animale, la mesure de température à l'intérieur d'un bâtiment requièrent des degrés de couverture plus faibles. D'autres applications comme la détection d'intrusion fonctionnent généralement avec un degré de couverture dynamiquement ajustable en fonction des zones de détection en alerte. Par conséquent, la nécessité de couverture d'une zone donnée varie en fonction des besoins applicatifs et doit être prise en considération dans la conception et le déploiement de certaines applications des RCSF [13] ».

4. Consommation d'énergie dans les RCSF

Parmi les raisons de perte d'énergie dans un réseau de capteur :

- Dans le cas d'une collision entre deux ou plusieurs paquets, ces derniers vont être rejetés et par conséquent retransmis par leurs émetteurs. Cette retransmission va augmenter la consommation d'énergie des nœuds capteurs émetteurs ;
- Le phénomène d'« idle-listening » : Il apparaît quand le nœud reste à l'écoute du médium pour recevoir des données possibles. Ce phénomène est très coûteux en énergie surtout dans le cas des applications qui ne nécessitent pas vraiment un échange de données ;
- Le phénomène d'« Over-hearing » c'est à dire que le nœud reçoit des paquets qui sont destinés à d'autres nœuds. Ce phénomène peut causer une importante perte d'énergie dans le cas d'une zone à forte densité avec un trafic assez volumineux.
- Le phénomène d'« Over-emitting » causé par la transmission d'un message vers un nœud qui n'est pas encore prêt à recevoir des données ;
- Les paquets de contrôle ou ce qu'on appelle « Over-head ».

La majorité des recherches dans le domaine des RCSF creusent dans la problématique de la consommation d'énergie.

5. Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous avons pu avoir une idée sur la technologie des RCSF, qu'est ce qu'un réseau de capteur, ses domaines d'application, sa pile protocolaire et ses contraintes d'utilisations. Ainsi, nous avons pu définir les notions les plus utilisées dans le domaine des RCSF.

Enfin, nous constatons qu'il existe quatre causes qui incitent à la consommation d'énergie. Plusieurs protocoles ont été proposés dans la littérature pour la conservation de l'énergie. Le chapitre suivant s'occupera de la présentation et l'exposition de ces protocoles.

Chapitre 2

Protocoles MAC pour les RCSF

Sommaire

1. Introduction	30
2. Couche MAC	30
2.1. Définition	30
2.2. Fonctionnalités	31
3. Caractéristiques d'un protocole MAC convenable aux RCSF	31
4. Classification des techniques de conservation énergétique	32
4.1. Technique basée sur le « duty cycle »	33
4.2. Technique basée sur le TDMA	33
4.3. Techniques hybrides	34
5. Protocoles MAC à « duty cycle »	34
5.1. Mode synchrone	34
5.2. Mode asynchrone	36
5.3. Protocoles hybrides	39
6. Conclusion	39

1. Introduction

Au cours de ces cinq années d'étude, nous avons appris que la couche MAC a pour rôle de définir les processus d'accès au support exécutés par le matériel. Mais nous devons savoir plus sur cette couche pour pouvoir s'approfondir encore plus.

Ce chapitre sera consacré à la couche MAC. Nous présentons dans un premier temps cette couche, ses fonctionnalités et ses protocoles. Nous expliquerons notamment la notion de « duty cycle » pour pouvoir entamer finalement notre objectif de recherche qui est l'amélioration du protocole B-MAC.

2. Couche MAC

2.1. Définition

Pour pouvoir parler des protocoles de la couche MAC nous devons savoir qu'est ce qu'une couche MAC ?

Il faut savoir que : « La couche MAC est une sous-couche de la couche liaison de données [14] »

La couche MAC est responsable de : « de gérer l'accès au support physique en évitant les collisions causées souvent par l'accès concurrentiels à ce médium physique. Cette couche est également responsable du contrôle des erreurs de transmission. En outre, elle assure la liaison point à point et multipoint du réseau dans les RCSF [15] ».

Ainsi, cette couche inférieure a pour rôle de : « définir les règles d'accès au canal. Dans les réseaux de capteurs, la transmission radio est la source principale de consommation d'énergie et l'activité radio est en grande partie commandée par la couche MAC [16] ».

En parlant des protocoles de cette couche, un protocole MAC conçu pour les réseaux de capteur sans fil doit décider à quel moment un nœud capteur change d'état ou de phase : « de veille à transmission » et « d'écoute à réception ». Ces phases doivent s'alterner dans le but de fournir un accès fiable, une faible latence et un débit équitable pour tous les capteurs.

Un protocole MAC permet : « en ce qui concerne l'énergie, d'optimiser au mieux les pertes, qui sont caractérisées par les collisions, l'écoute pour la réception de données, les délais d'accès au réseau, l'over-hearing c.-à-d. la réception de messages destinés à d'autres nœuds, le contrôle de l'over-head ou encore over-emitting c.-à-d. la transmission de messages

quand le destinataire n'est pas prêt. Donc, pour économiser au mieux l'énergie de la batterie d'un capteur, il faudrait que les transmetteurs radio soient éteints le plus longtemps possible. Cependant, ceci pourrait poser le problème de la synchronisation des capteurs et la répartition des périodes de réveil. Ainsi, il faudrait que la couche MAC permette aux capteurs d'avoir des périodes de sommeil assez longues, mais sans perturber les communications. Le protocole MAC dédié aux réseaux de capteurs devrait être efficace en terme d'énergie, stable lorsque la taille du réseau augmente, et adaptatif aux changements de la topologie et de la connectivité du réseau lorsque les capteurs cessent de fonctionner, ou de se déplacer [16] ».

2.2. Fonctionnalités

La sous-couche MAC ressemble beaucoup à celle de la norme *Ethernet* (IEEE 802.3) puisqu'elle assure la gestion d'accès de plusieurs stations à un support partagé dans lequel chaque station écoute le support avant d'émettre.

Elle fournit les fonctionnalités suivantes :

- Contrôle d'erreur permettant de contrôler l'intégrité de la trame à partir d'un *Cyclic Redundancy Check* (CRC);
- Fragmentation et réassemblage;
- Adressage et formatage des trames ;
- Contrôle d'accès au support en utilisant les deux algorithmes PCF et DCF ;
- Gestion de la mobilité ;
- Gestion d'énergie ;
- Gestion de la sécurité ;

3. Caractéristiques d'un protocole MAC convenable aux RCSF

Afin de concevoir le protocole MAC le mieux adapté avec les spécificités des réseaux de capteurs, on doit prendre en considération les propriétés suivantes [17] :

- **Optimisation d'énergie**

Cette propriété est la plus importante de toutes dans le cas des WSN. En effet, le fait qu'il est difficile de changer ou de recharger les batteries (source d'énergie) des nœuds, constitue un vrai handicap qui limite leur durée de vie.

Comme la couche MAC contrôle les activités de la couche radio qui à son tour consomme le plus d'énergie, alors on peut déduire que la couche MAC peut gérer cette consommation en essayant d'empêcher les pertes de cette énergie.

- **Scalabilité et adaptabilité**

Comme les réseaux de capteurs sont des réseaux dynamiques que ce soient aux niveaux de leurs tailles, leurs densités ou leurs topologies ; Alors dans ce cas, un protocole MAC efficace doit gérer rigoureusement ces changements sans qu'il y ait un dysfonctionnement du réseau (adaptation rapide avec succès).

La scalabilité et l'adaptabilité à ces changements constituent deux caractéristiques très importantes vu la nature des réseaux de capteurs (déploiement aléatoire, environnement non assuré...).

- **Eviter les collisions**

Elle constitue la mission principale de tous les protocoles MAC que ce soient pour les réseaux filaires ou les réseaux sans fil, contention free ou contention-based.

- **Bande passante (ou capacité du canal)**

C'est une caractéristique importante plutôt dans le cas des réseaux cellulaires (GSM) ou des réseaux locaux sans fils (WLAN), que dans le cas des réseaux de capteurs ; En effet, le débit est un objectif secondaire pour les WSN.

- **Débit**

C'est la quantité de données transmises avec succès entre un émetteur et un récepteur dans un temps bien déterminé. Il constitue une caractéristique pas assez importante dans le cas des WSN vu la nature des informations échangées entre les nœuds.

4. Classification des techniques de conservation énergétique

Plusieurs classifications des techniques de conservation d'énergie ont été proposées dans la littérature. Comme le montre la **Figure 2.1**, les techniques de conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs se divise en trois parties qui sont : la technique basée sur le « duty cycle », la technique basée sur le TDMA et enfin les techniques orientées données. Il existe aussi d'autres protocoles MAC hybrides qui combinent les techniques d'accès TDMA et CDMA.

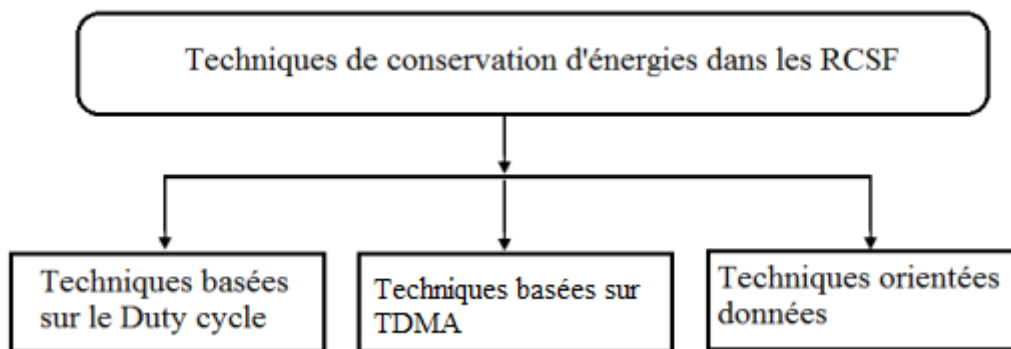


Figure 2.1 : Les techniques de conservation d'énergie dans les RCSF

Nous allons décrire par la suite brièvement ces trois techniques en détaillant beaucoup plus la technique basée sur le « duty cycle ».

4.1. Technique basés sur le “duty cycle”

Dans les protocoles MAC basées sur la technique à duty cycle, chaque nœud capteur alterne entre des périodes actives « radio ON » et des périodes inactives « radio OFF ou mode sleep » afin de conserver son énergie. Le duty cycle est ainsi défini comme étant la proportion de la période active sur la durée totale d'un cycle (période active + période inactive). Donc, il est évident qu'un duty cycle faible permet aux nœuds de consommer moins d'énergie. Par conséquent, dans ces approches, on cherche à minimiser le duty cycle tout en garantissant le bon fonctionnement du RCSF. Plusieurs protocoles MAC que nous présenterons par la suite de ce chapitre sont proposés dans ce sens [18].

4.2. Technique basés sur TDMA

Les protocoles MAC basés sur TDMA ont été aussi proposés dans le but de réduire la consommation énergétique dans les RCSF. Dans ces protocoles implémentés généralement dans les architectures centralisées, le temps est divisé en trames et ce dernier est composé d'un certain nombre de temps élémentaires appelés slots de temps « *slots time* ». Ensuite, une politique d'ordonnancement permettant d'allouer à chaque nœud capteur plusieurs slots time par trame est mise en œuvre. Avec l'allocation de ces slots time, chaque nœud peut ainsi connaître le début de sa transmission pour une trame donnée et la durée de cette transmission vers un ou plusieurs nœuds récepteurs. Chaque nœud utilise également l'allocation de ses slots time pour la réception des données qui lui sont destinées. Dans la majeure partie des cas, un coordonnateur doit se charger de la centralisation et de la coordination dans le réseau. Il est

ainsi chargé de la distribution des slots time entre les différents nœuds qu'il gère. Ces protocoles basés TDMA sont efficaces en termes de consommation énergétique dans la mesure où le module radio d'un nœud donné n'est allumé que durant ses propres slots time, et éteint en dehors de ses slots time. Cependant, ces protocoles ont un certain nombre de limites dues le plus souvent aux aspects dynamiques du RCSF tels que les variations temporelles du canal de transmission, les défaillances de certains nœuds capteurs qui ont épuisé leur énergie, ...etc [18].

4.3. Technique basée sur des protocoles hybrides

D'autres protocoles MAC hybrides combinant CSMA et TDMA ont aussi été développés pour les RCSF. En plus de la réduction de la consommation énergétique des capteurs, l'autre avantage des protocoles MAC hybrides est surtout la réduction des interférences entre nœuds capteurs voisins. Ainsi, les nœuds peuvent se synchroniser pour accéder au canal sans problème de contention. Cependant, le principal inconvénient de ces protocoles demeure leur complexité [18].

5. Protocoles MAC à duty cycle

Il existe plusieurs protocoles MAC basés sur cette technique à « duty cycle », qui se divisent en trois modes : le mode synchrone, le mode asynchrone et le mode hybride.

Nous allons citer et présenter brièvement quelques protocoles de chaque mode afin de pouvoir comprendre leurs fonctionnements.

5.1. Mode Synchrone

Il faut savoir que dans le mode synchrone : « Le « duty-cycle » est déterminé par un échange de messages de synchronisation. Chaque nœud connaît quand est-ce que ces nœuds voisins sont à l'état actif. Ainsi, le nœud émetteur attend jusqu'à ce que le récepteur entre en état actif pour lui transmettre son message [19] ».

5.1.1. Protocole S-MAC

La connaissance d'un protocole exige de savoir pourquoi il est conçu. Et en parlant du protocole S-MAC on doit savoir qu'il est l'un des premiers protocoles MAC basés sur le « duty cycle » et que : « SMAC est un protocole MAC spécialement conçu pour les WSN. Il a été proposé à l'université de Californie, Los Angeles ».

Il a pour objectif de : « réduire les pertes d'énergie dûes aux causes qu'on a identifiées (idle-listening, collision, overhearing et control overhead.) ».

Le protocole SMAC supporte la scalabilité et l'évitement des collisions.

- **Fonctionnement**

Dans le S-MAC, chaque nœud capteur alterne entre une période active et période inactive afin de sauvegarder son énergie. Avec un tel mécanisme d'ordonnement, les nœuds capteurs peuvent économiser leur énergie en réduisant considérablement l'écoute active du canal. Toutefois, soulignons que ce protocole a quelques limitations. En effet, tous les nœuds capteurs diffusent leurs ordonnancements des périodes actives et inactives à tous leurs voisins de communication. Ainsi, avec ce mécanisme, nous pouvons noter une certaine perte d'efficacité énergétique et des collisions fréquentes (surtout dans le cas de réseaux denses). En outre, les périodes actives et inactives de chaque nœud sont prédéfinies et fixes. Enfin, tous les nœuds au niveau des frontières maintiennent leurs modules radio allumées durant toutes leurs périodes actives, ce qui a comme conséquence une sur-écoute du canal.

5.1.2. Protocole T-MAC

Toujours dans le concept à « duty cycle » il existe un autre protocole MAC synchrone qui est le T-MAC : « est une version améliorée du protocole S-MAC. A l'instar de S-MAC, chaque nœud dans T-MAC alterne entre périodes actives et périodes inactives afin d'optimiser son énergie [19] ».

La principale amélioration de T-MAC par rapport à S-MAC porte sur : « l'adaptation du « duty cycle » en fonction de la variation du trafic réseau. T-MAC augmente de façon significative la durée de vie du réseau par la réduction des longueurs des périodes actives, permettant ainsi à chaque nœud de pouvoir déterminer approximativement quand il sera actif ou inactif. Cependant, dans T-MAC, les nœuds diffusent également leurs ordonnancements des périodes actives et inactives à tous leurs voisins de communication via les paquets de synchronisation. Ainsi, à l'instar de S-MAC, ce mécanisme de diffusion n'est pas efficace en termes de consommation énergétique [19]».

- **Fonctionnement**

T-MAC étend S-MAC et fournit plusieurs améliorations. Au lieu de fixer la période active, T-MAC raccourcit la période active après un temps s'il n'a pas détecté d'activité sur le

canal. Une autre amélioration consiste à maintenir le nœud en état actif pendant un temps time-out afin de pouvoir continuer à transmettre des paquets en une rafale. La période active est aussi réajustée pour s'adapter à la variation du trafic (le duty-cycle sera variable dans ce cas). Le défaut de T-MAC est le problème de sur-écoute car un nœud, même s'il n'est pas impliqué dans la communication, doit rester actif pendant un temps de timeout [19].

5.2. Mode Asynchrone

Tant dis que dans le mode asynchrone : « Les nœuds ne connaissent pas quand est-ce que leurs voisins sont actifs. Ils se mettent alors périodiquement à l'écoute du canal pour vérifier s'il y a une transmission qui va avoir lieu. Cette méthode est connue sous le nom de LPL ».

5.2.1. Protocole B-MAC

B-MAC est l'un des protocoles MAC asynchrone à « duty cycle ». Il est basé sur deux principes : « l'analyse du bruit sur le canal radio et sur l'écoute basse consommation. Quand un nœud désire envoyer un paquet, il détermine si le canal radio est utilisé par un autre nœud ou pas en écoutant le "bruit" en se basant sur un indicateur de puissance du signal. S'il n'y a pas de bruit, le canal est libre et il peut donc émettre. Avant d'envoyer des données, il doit émettre un préambule ».

Il a été développé par l'Université de Berkeley. Dans ce protocole, les nœuds capteurs utilisent la technique LPL afin d'alterner entre périodes actives et périodes inactives. Dans la technique LPL, l'état actif de chaque nœud est généralement d'une durée très courte, permettant juste au nœud de vérifier l'état du canal (CCA). En outre, afin d'assurer la synchronisation entre émetteurs et récepteurs, chaque nœud source précède sa transmission avec la diffusion d'un préambule de longueur supérieure au temps nécessaire pour que le récepteur potentiel soit réveillé. De cette façon, B-MAC offre une bonne efficacité énergétique. Cependant, étant donné que ce protocole utilise le mécanisme CSMA-CA pour l'accès au canal, il souffre du problème de collisions fréquentes à forte charge. Une autre limitation de B-MAC est la sur-écoute du canal due à l'envoi d'un long préambule qui doit être nécessairement reçu par tous les voisins de communication (récepteurs potentiels) d'une source donnée, même si ces données ne sont pas destinées à tout le voisinage de cette source.

- **Fonctionnement**

B-MAC adopte la fameuse technique LPL. Les nœuds commutent périodiquement entre état actif et inactif (radio éteinte). L'état actif est en général de très courte durée, juste permet au nœud d'échantillonner le canal. Quand un nœud se réveille, il allume sa radio et vérifie l'état du canal (CCA : Clear Channel Assessment). S'il ne détecte pas une activité, il se rendort. Dans le cas contraire, il reste actif pour recevoir le paquet. Après la réception, le nœud repasse en mode inactif. Du côté de l'émetteur, chaque transmission d'un paquet est précédée par la transmission d'un long préambule. La taille du préambule doit être plus longue que l'intervalle de réveille afin d'être sûr de pouvoir être détecté par un récepteur (prochain saut). De cette façon, le récepteur est averti pour recevoir le paquet de données. B-MAC offre une bonne efficacité énergétique et la période active de chaque nœud récepteur peut être prolongée ou raccourcie en fonction de la charge de l'émetteur. Il est donc avec « duty-cycle » dynamique auto-adaptant à la variation du trafic. B-MAC propose aussi une interface de haut niveau permettant de reconfigurer l'intervalle de réveil pour trouver un bon compromis entre l'énergie et le débit du réseau.

Puisque B-MAC utilise CSMA/CA pour l'accès au médium, il souffre du problème de débit lors de la charge élevée à cause des collisions et les périodes de backoff aléatoires nécessaires pour éviter les collisions. Un autre problème est la sur-écoute du préambule par des nœuds voisins car même si le paquet n'est destiné qu'à un nœud particulier (prochain saut), tous les autres nœuds voisins doivent quand même écouter le préambule jusqu'à la fin. Notons toutefois que cette sur-écoute n'a pas que des effets néfastes car elle peut aussi servir pour choisir des routeurs multiples.

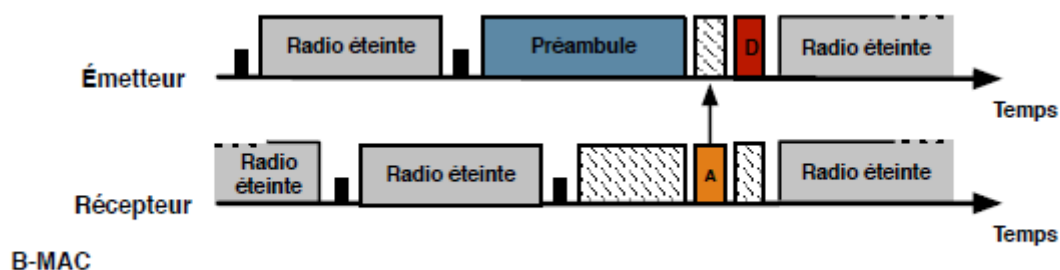


Figure 2.2 : Fonctionnement du protocole B-MAC

5.2.2. Protocole X-MAC

Le X-MAC est un autre protocole asynchrone de la technique de « duty cycle ». Ce protocole est une amélioration de B-MAC, mais quelle est la différence entre eux ?

D'après plusieurs sources : « L'apport majeur de X-MAC par rapport à B-MAC porte sur la résolution du problème de la sur-écoute du canal causée par la transmission de longs préambules ».

- **Fonctionnement**

Chaque préambule dans X-MAC est divisé en une série de préambules plus petits, ce dernier possède l'adresse du destinataire du paquet à transmettre. Un petit intervalle de temps sépare deux préambules afin de donner au destinataire le temps d'envoyer un acquittement ou ce qu'on appelle ACK s'il reçoit le préambule bien évidemment.

Ce mécanisme permet à l'émetteur de s'assurer que le récepteur est prêt à recevoir les données et il pourra enfin démarrer sa transmission.

Nous pouvons constater que ce protocole fournit de meilleures performances en termes d'efficacité énergétique par rapport à B-MAC dans la mesure où il permet de réduire la sur-écoute du canal. Aussi, Nous avons trouvé que : « ce protocole limite le choix des routes parce qu'il permet de choisir uniquement un seul nœud relais à un saut pour aiguiller les données jusqu'à la station de base. Par conséquent, cette contrainte sur le choix des routes peut poser des problèmes de robustesse au niveau du routage [21]».

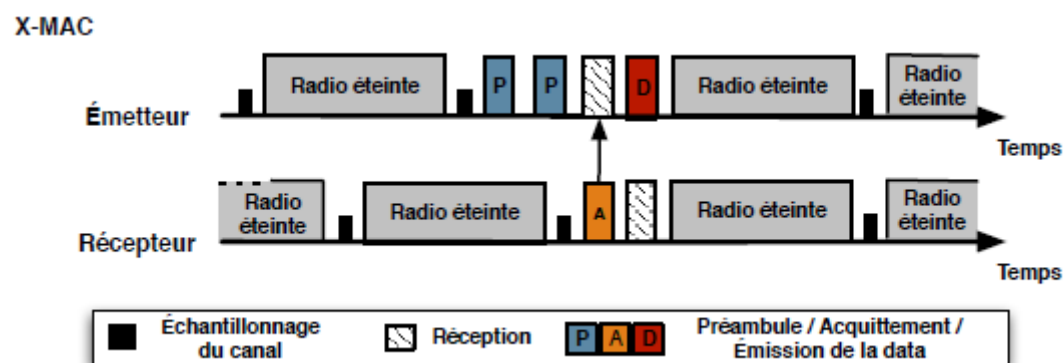


Figure 2.3 : Fonctionnement du protocole X-MAC

5.3. Protocoles Hybrides

5.3.2. Protocole Z-MAC

Z-MAC est l'un des premiers protocoles MAC hybrides basé sur le « duty cycle », il combine les techniques CSMA et TDMA. La question qui se pose est : En quoi utilise-il ces deux techniques ?

Nous avons pu trouver une réponse convenable à notre question : « les nœuds utilisent CSMA comme protocole d'accès au support et emploient un ordonnancement de type TDMA afin d'améliorer la résolution de la contention entre les nœuds ».

- **Fonctionnement**

Et parlant de son fonctionnement, nous avons trouvé que : « avec Z-MAC, chaque nœud du réseau démarre avec une phase de découverte de voisinage à deux sauts afin de construire sa table de voisinage. Après cette phase, une deuxième phase d'attribution de « slots time » pour chaque nœud est lancée. Cette attribution est faite de telle sorte que deux nœuds dans un voisinage à deux sauts ne peuvent pas avoir les mêmes slots time. Avec cette technique, lorsqu'une source transmet, les interférences avec les autres transmissions de ses nœuds voisins à un saut sont évitées. Ainsi, dans Z-MAC, les nœuds peuvent se synchroniser pour accéder au canal sans problème de contention ».

Nous constatons que ce protocole n'est pas adapté à une topologie de réseau dense, et c'est ce qui a été déjà prouvé : « Lorsque plusieurs nœuds voisins attendent d'émettre, ils doivent se disputer les slots time inoccupés par leurs voisins. Un tel mécanisme entraîne des contentions qui sont synchronisées au niveau de chaque slot time, réduisant ainsi la probabilité d'accès au canal » et tout ça est considéré comme un inconvénient. De plus, avec ce mécanisme consommation énergétique pour une transmission donnée dépend de la durée des slots time allouées pour cette TX. Donc, plus les durées des slots time sont élevées pour une TX plus la consommation énergétique augmente pour cette TX.

6. Conclusion

Alors, dans ce chapitre nous avons pu voir qu'est ce qu'une couche MAC, ses fonctionnalités et ses protocoles. Ainsi, nous avons défini la notion de « duty cycle ».

Et puis, nous avons pu voir quelques protocoles MAC de chaque mode de la technique à « duty cycle », et leur fonctionnement. Passons maintenant à la seconde partie qui va être consacrée à la présentation de notre contribution.

Deuxième partie :

Implémentation

Chapitre **3**

Présentation de notre proposition

Sommaire

1. Introduction	43
2. Objectif	43
3. Vue d'ensemble de notre proposition	43
4. Présentation du protocole IB-MAC	45
5. Fonctionnement du protocole IB-MAC	45
6. Déroulement du protocole IB-MAC	46
7. Organigramme de fonctionnement	49
8. Conclusion	50

1. Introduction

Après avoir présenté le cadre théorique de notre travail, on se penche maintenant sur la deuxième partie dans le but de présenter notre méthodologie et pour vérifier nos hypothèses de départ, pour voir si notre proposition contribue à la résolution du problème de la consommation d'énergie.

2. Objectif

Notre étude de l'art effectuée dans les chapitres précédents nous a montré que parmi les approches les plus appropriées qui permettent d'assurer une bonne communication tout en économisant la consommation d'énergie au sein d'un réseau de capteurs sans fil est la conception d'un protocole MAC qui permettra de répondre aux besoins.

Notre proposition dans ce travail doit pouvoir résoudre le problème des collisions, l'une des raisons principale de la perte d'énergie, par l'établissement de ce qu'on appelle l'évitement des collisions par attente aléatoire.

Et aussi, trouver une solution pour la source de gaspillage d'énergie « idle-listening : écoute de la porteuse à vide » qui est très couteuse en énergie, et cela par le découpage de la longue séquence de préambule envoyer par un nœud émetteur avant la transmission des données.

3. Vu d'ensemble de notre proposition

Pour assurer une meilleure communication entre les nœuds et afin de prolonger leur durée de vie il est nécessaire de concevoir un protocole MAC qui permettra de gérer la consommation d'énergie par les nœuds capteurs dans ce type de réseau. Alors comment garder un bon fonctionnement au sein d'un réseau de capteurs tout en économisant l'énergie des nœuds ?

Afin d'économiser cette consommation d'énergie dans le protocole B-MAC due à la transmission d'une longue séquence de préambule, nous avons proposé de modifier cette dernière dans le but de répondre à notre problématique.

Comme nous avons déjà expliqué dans le précédent chapitre, le B-MAC utilise le protocole CSMA/CA dans le but d'éviter les collisions dans le RCSF. Il a été développé à Berkeley et implémenté sous TinyOS pour réduire la consommation d'énergie due à l'écoute

active. B-MAC utilise la technique préambule simple. Cette dernière est appelée LPL (l'écoute à faible consommation d'énergie).

La **Figure 3.1** suivante illustre le réel fonctionnement du protocole B-MAC qui va nous aider non seulement à comprendre le fonctionnement détaillé du protocole B-MAC mais aussi à avoir une idée sur le déroulement du protocole amélioré qu'on va présenter par la suite :

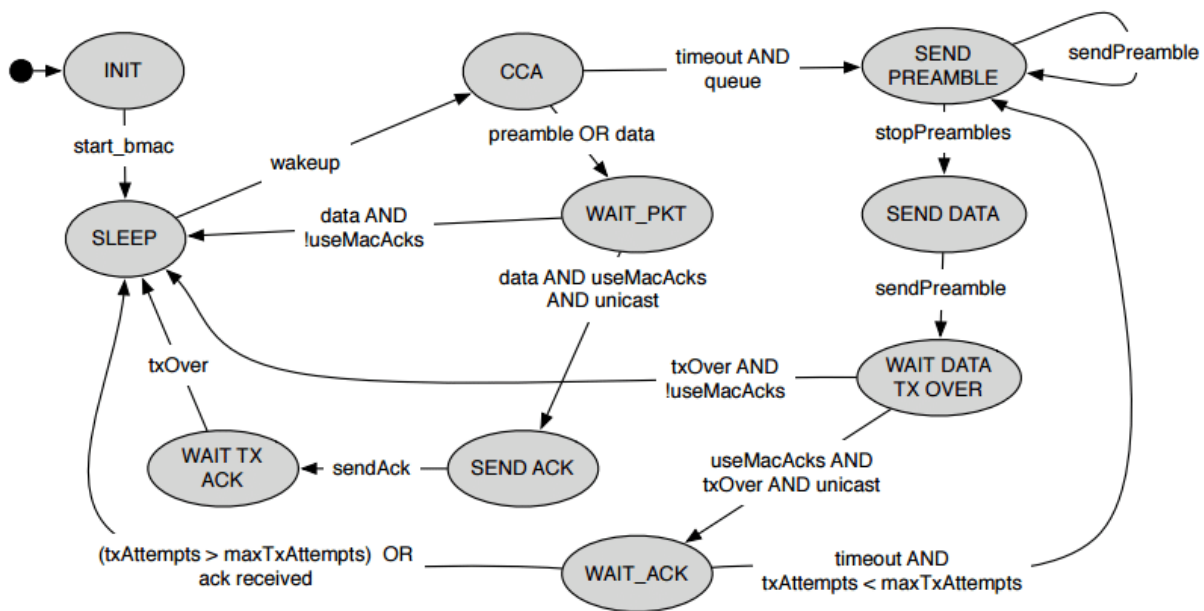


Figure 3.1 : Machine à états finis du protocole IB-MAC

La description de la machine à états finis du fonctionnement du nœud émetteur et du récepteur avec le protocole B-MAC illustrée sur la **Figure 3.1** s'explique comme suit :

1. Au démarrage chaque nœud dans le réseau bascule en mode SLEEP (veille) ;
2. Le nœud bascule à l'état CCA, après l'expiration de sa période de veille ;
3. Pendant l'état CCA, si le nœud reçoit un préambule, il passe immédiatement à l'état WAIT_PKT ;
4. Si aucun message n'est détecté pendant le CCA (CCA_timeout est atteint) il va commencer à envoyer la séquence de préambules ;
5. Quand le nœud émetteur reçoit un message STROP PREAMBLE il interrompt l'envoi des préambules et il envoie directement les données et bascule en état SEND DATA ;
6. Après la réception du paquet de donnée de la part du nœud récepteur, il passe à l'état SEND_ACK et attend la fin de l'envoi pour basculer à nouveau en mode veille ;
7. De même, quand le nœud émetteur reçoit l'accusé de réception des données envoyées il bascule en mode SLEEP;

4. Présentation du protocole IB-MAC

Vu que notre travail consiste à une modification du protocole B-MAC, nous avons pensé à le nommer IB-MAC.

IB-MAC va être une amélioration du protocole B-MAC. L'apport majeur de ce protocole par rapport au B-MAC porte sur la longueur du préambule. Dans le B-MAC le transmetteur envoie un long préambule avant l'envoi des données. Notre travail consiste à découper ce long préambule en un ensemble de petits préambules afin d'économiser la consommation d'énergie du nœud. Mais comment le découper ?

5. Fonctionnement du IB-MAC

On doit tout d'abord expliquer le fonctionnement du protocole, mais avant toute chose nous devons connaître quelles sont les améliorations proposées. Alors, quelle est la différence entre le B-MAC et le IB-MAC ?

Le IB-MAC est une amélioration du B-MAC pour résoudre le problème de la sur-écoute. Au lieu de transmettre un long préambule, IB-MAC le divise en un ensemble de petits paquets de préambule et le transmet tout en insérant un intervalle de temps entre eux. Ces intervalles permettent au nœud destinataire d'envoyer un acquittement lorsqu'il reçoit l'un de ces paquets préambules. Une fois que l'émetteur reçoit l'acquittement, il sait que le nœud prochain saut est réveillé et interrompt l'envoi des suites des paquets de préambule, puis envoie immédiatement le paquet vers celui qui a envoyé un acquittement. Le BB-MAC va permettre d'améliorer l'efficacité énergétique et réduire le délai grâce au préambule raccourci.

La taille réduite du préambule dans le IB-MAC s'explique comme suit :

- **Coté émetteur :** Le nœud source envoie un court préambule avant la transmission de ses données et il va attendre un acquittement de la part du nœud récepteur. Les données ne vont être envoyées qu'après la réception de l'acquittement sinon le nœud se rendort.
- **Coté récepteur :** Pendant l'écoute du canal si le nœud récepteur reçoit un préambule il va envoyer un accusé de réception au nœud source ce qui permettra enfin au nœud émetteur d'envoyer ses données.
- Une fois que le nœud émetteur s'apprête enfin à envoyer ses données, notre protocole va suivre le même déroulement que celui du protocole B-MAC mais il va y avoir

quelques modifications en ce qui concerne les adresses qu'on va expliquer en détails par la suite.

6. Déroulement du protocole IB-MAC

Nous allons maintenant détailler le protocole et citer tous les états ou étapes par lesquels il va passer :

- **Démarrage** : tout comme le B-MAC, l'état initial du nœud dans le protocole IB-MAC est l'état « sleep » ;

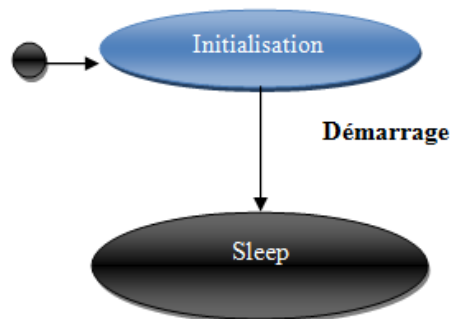


Figure 3.2 : L'état initial dans le protocole IB-MAC

- **L'écoute du canal** : le nœud se réveille périodiquement pour écouter le canal et voir s'il existe des activités ou des données à échanger ;
 - Si le temps de l'écoute s'écroule et que le capteur détecte un bruit, signe d'existence des activités, il passe en mode veille ;
 - Si le temps de l'écoute s'écroule et que le canal est libre, le nœud va vérifier sa file d'attente. Si la file est vide le nœud se rendors immédiatement sinon il commence à envoyé les petits paquets de préambules;
 - Si pendant l'écoute du canal le nœud reçoit un préambule, il va envoyer un accusé de réception « send ackk » au nœud émetteur pour lui indiquer la réception du préambule ce qui va lui permettre d'envoyer ses données mais l'envoi de l'accusé se fait après une certaines période aléatoire qui va nous éviter les collisions.

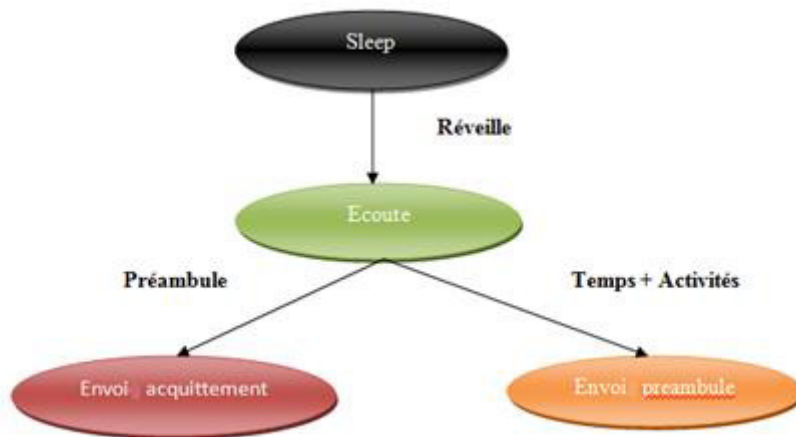


Figure 3.3 : L'écoute du canal dans le protocole IB-MAC

• **L'attente et l'envoi des données :**

- Maintenant que le nœud récepteur de données a envoyé un acquittement à l'émetteur, il va passer à l'état « wait data » pour attendre les données ;
- En même temps et après la réception de l'acquittement de la part du nœud source, il passe directement à l'état « send data » ce qui signifie l'envoi des données ;
- Si le nœud source ne reçoit aucun acquittement, il va diffuser un autre préambule mais si jamais il dépasse le temps maximum d'attente il se rendort.

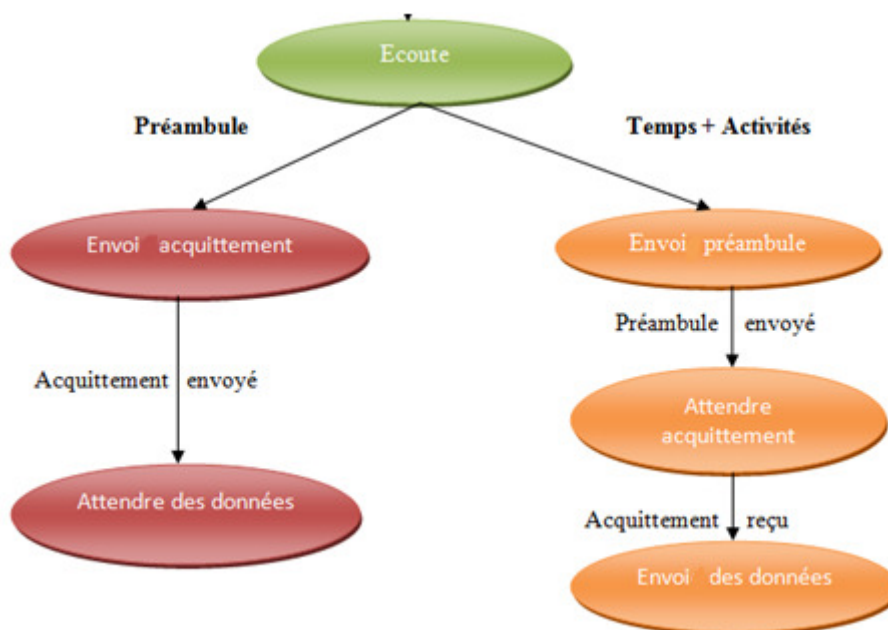


Figure 3.4: L'attente et l'envoi des données dans le protocole IB-MAC

- **La réception des données :**

- Après l'envoi des données, le nœud source va attendre un accusé de réception des données « wait ack » pour savoir s'il retourne à l'état « sleep » ou s'il doit renvoyer les données « re-send data » dans le cas où le nœud récepteur n'a pas reçu les données attendues ;
- De même, si le nœud récepteur reçoit des données, il va envoyer un accusé de réception « send ack » pour clôturer la communication et il retourne à l'état initial « sleep » ;

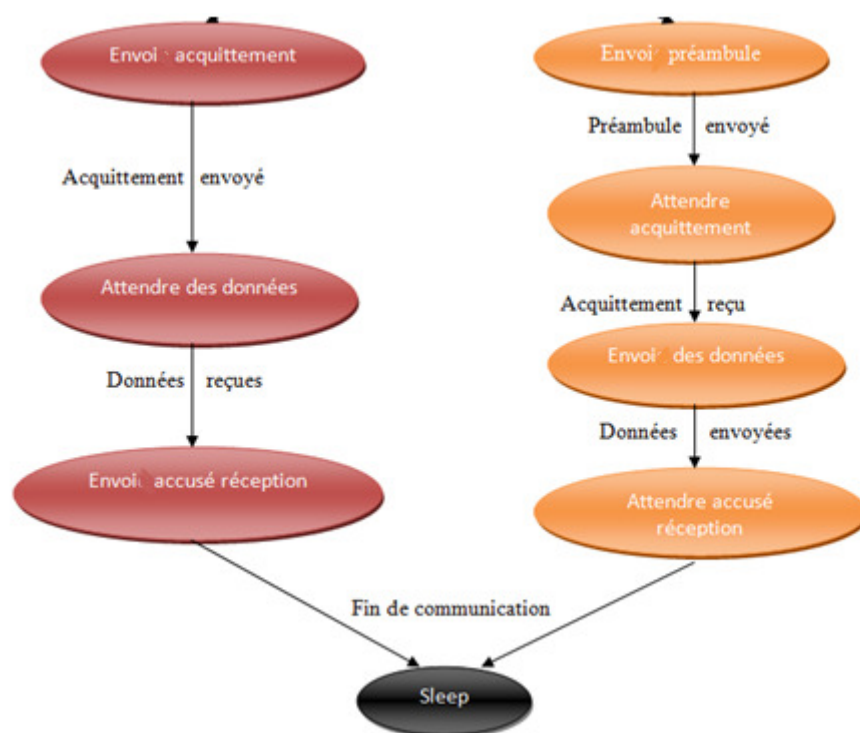


Figure 3.5: La réception des données

- **Adresses**

En ce qui concerne les adresses ça va se dérouler comme suit :

- Tout d'abord dans le cas d'un nœud source, le préambule va être broadcasté pour que tous les voisins puissent le recevoir ;
- Dès que le nœud destinataire reçoit un préambule, il va garder l'adresse de l'émetteur, celui qui lui a envoyé le préambule ;
- Après la réception du préambule de la part du nœud destinataire, ce dernier doit répondre par l'envoi d'un accusé de réception. Cet acquittement doit être envoyé non

pas à tous les voisins mais seulement à celui qui lui a envoyé le préambule. Donc il va vérifier si sa réponse est unicast ;

- Maintenant que le nœud source attend un acquittement pour enfin pouvoir envoyer ses données et qu'il reçoit un acquittement, il doit vérifier si ce dernier est venu de la part du même nœud qui a reçu le préambule ou pas par la vérification des adresses.

7. Organigramme de fonctionnement

Nous allons présenter un schéma ou ce qu'on appelle machine à état fini qui va nous résumer tout ce qu'on a expliqué auparavant. Nous allons commencer par l'établissement d'un petit tableau dont lequel on trouvera la signification de quelques abréviations et mots utilisées dans le schéma.

Signification	
Start Ibmac	Démarrage
Wakeup	Réveiller
Sleep	Endormi
CCA	Ecoute du canal
Send preamble	Envoi du préambule
Send Ackk	Envoi de l'acquittement du préambule
Wait data	Attendre les données
Send data	Envoi des données
Wait Ackk	Attendre l'acquittement du préambule
Wait Ack	Attendre l'accusé de réception des données
Send Ack	Envoi d'un accusé de réception de données
txAttempts	Tentative de transmission
maxtxAttempts	Nombre maximal de tentatives de transmission par paquet de données
Data	Message de données
Ack	Accusé de réception des données
Ackk	Accusé de réception du préambule

Tableau 3.1 : Signification de quelques abréviations

Chapitre **4**

Simulation du protocole IB-MAC

Sommaire

1. Introduction	52
2. Présentation de l'environnement de développement	52
2.1. OMNeT++	52
2.2. Mixim	53
3. Architecture d'OMNeT++	54
4. Simulation	55
4.1. Paramètres de simulation	55
5. Métriques d'évaluation des performances	55
5.1. Consommation d'énergie moyenne	55
6. Conclusion	56

1. Introduction

Après avoir présenté notre travail dans le chapitre précédent, nous allons enfin pouvoir entamer ce chapitre qui sera consacré pour l'exposition des résultats de la simulation du protocole IB-MAC, mais nous commençons tout d'abord par la présentation de l'environnement de travail qui est le OMNeT++.

2. Présentation de l'environnement de développement

Les simulateurs réseaux peuvent être divisés en plusieurs types : « par protocoles, par technologie ou par méthodes de traitement, mais la catégorisation la plus utilisée est les méthodes de simulation. Il existe typiquement deux méthodes de simulation : méthode à événements discrets et méthode de simulation analytique. La première méthode produit des prédictions dans le bas niveau du réseau (paquet par paquet), pour qu'ils deviennent exacts mais la génération des résultats est lente. La deuxième méthode utilise des modèles mathématiques pour produire les résultats à une vitesse beaucoup plus rapide, mais elle peut sacrifier l'exactitude [21]».

Tout d'abord il faut savoir que la simulation a pour rôle d'étudier et de surveiller le comportement dynamique des réseaux sans fil tout en minimisant le cout, permettant de rendre flexible notre réseau et contrôlant totalement la plate forme expérimentale.

Pour ce faire, nous avons choisi OMNeT++ comme environnement de simulation. Il est largement utilisé par les chercheurs et académiciens vu qu'il est un logiciel open source.

2.1. OMNeT++

OMNET++ est un environnement de simulation à évènements discrets orienté objet, basé sur C++. Son grand avantage qu'il est open source (projet a débuté depuis 1992). Il est utilisé pour la simulation des réseaux de communication, les systèmes multiprocesseurs, et d'autres systèmes distribués. Grâce à son architecture modulaire, OMNET++ est très largement répandu dans divers domaines d'applications telles que [22] :

- La modélisation des protocoles de communications ;
- La modélisation des réseaux filaires et sans fils ;
- La modélisation des systèmes repartis ;
- Les architectures Hardware ;

- En général, il peut être utilisé pour n'importe quel système évènements discrets pouvant être modélisé selon des entités communiquant par envoi de messages.



Figure 4.1 : Logo d'OMNeT

OMNeT++ est basé sur la plateforme Eclipse. Il fournit des outils pour la création et la configuration des modèles de réseaux (les fichiers NED et INI) et des outils pour l'exécution des programmes ainsi que pour l'analyse des résultats de simulation.



Figure 4.2 : La Version d'OMNeT utilisée

« L'avantage de OMNET ++ est sa facilité d'apprentissage, d'intégration de nouveaux modules et la modification de ceux déjà implémentés [22]». Nous introduisons dans la suite l'architecture du simulateur OMNET++.

2.2. Mixim

MIXIM (Mixed Simulator) « est un cadre de modélisation OMNeT++ créé pour les réseaux sans fil mobiles et fixes (réseaux de capteurs sans fil, réseaux ad hoc, ...etc.). Il propose des modèles détaillés de propagation des ondes radio, d'estimation des interférences, de consommation d'énergie des émetteurs- récepteurs radio et de protocoles MAC sans fil [23]».

3. Architecture d'OMNeT++

L'architecture d'OMNET++ est hiérarchique composée de modules. Un module peut être soit module simple ou bien un module composé. Les feuilles de cette architecture sont les modules simples qui représentent les classes C++. Pour chaque module simple correspond un fichier « .c » et un fichier « .h ». Un module composé est composé de simples modules ou d'autres modules composés connectés entre eux. Les paramètres, les sous modules et les ports de chaque module sont spécifiés dans un fichier « .ned ».

La communication entre les différents modules se fait à travers les échanges de messages. Les messages peuvent représenter des paquets, des trames d'un réseau informatique, des clients dans une file d'attente ou bien d'autres types d'entités en attente d'un service. Les messages sont envoyés et reçus à travers des ports qui représentent les interfaces d'entrer et de sortie pour chaque module.

La conception d'un réseau se fait dans un fichier « .ned » et les différents paramètres de chaque modules sont spécifiés dans un fichier « .ini ». OMNET++ génère à la fin de chaque simulation deux nouveaux fichiers « omnet.vec » et « omnet.sca » qui permettent de tracer les courbes et calculer des statistiques [22].

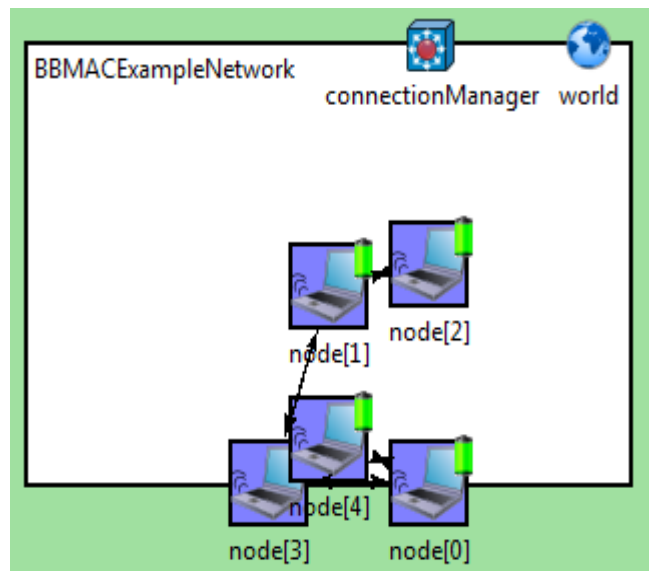
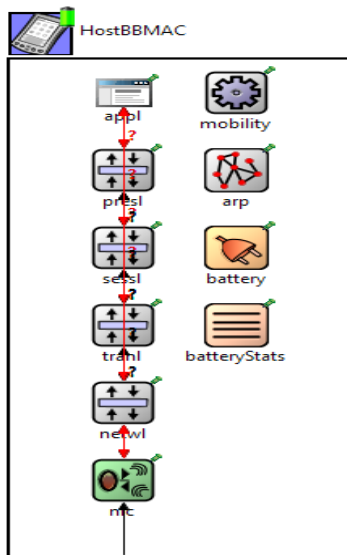


Figure 4.2: La pile protocolaire d'un nœud

Figure 4.3: Déploiement des nœuds

4. Simulation

4.1. Paramètres de simulation

Dans le but de tester l'effet de la variation de la densité du réseau sur les différentes métriques de performance étudiée, nous avons varié le nombre de nœuds capteurs dans le réseau de 5 jusqu'à ... 100 nœuds avec une source de trafic.

Le tableau suivant représente les paramètres de simulation qu'on va utiliser pour simuler notre protocole :

Couche	Paramètres	Valeur
App	Surface	300*300 m ²
	Nombre de nœuds	5, ..., 100
	Déploiement	Aléatoire
	Temps de simulation	250 s
Mac	Taille queue	2
	Intervalle de vérification	0.1 s
	Durée d'un slot	1s
	Débit	15360 bps
Phy	Energie de transmission	100 mW

Tableau 4.1 : Les paramètres utilisés pour la simulation

5. Métriques d'évaluation des performances

Nous avons étudié les performances du protocole selon les deux métriques suivantes:

5.1. Consommation d'énergie moyenne

Comme la capacité énergétique des nœuds capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau, le protocole MAC adopté doit assurer une gestion optimale de cette ressource. Sa valeur correspond à l'énergie totale consommée par chaque nœud du réseau. En général, la consommation d'énergie est proportionnelle au nombre de paquets traités et au type du traitement effectué. L'énergie totale consommée est calculée en utilisant la formule suivante [21] :

$$\text{Energie moyenne consommée} = \sum_{i=0}^n (\text{consommation d'énergie d'un nœud} / n$$

n : Nombre de nœud

Pour calculer la consommation d'énergie moyenne nous avons essayé de varier la densité du réseau de 10 nœuds jusqu'à 100 nœuds pour le protocole B-MAC et le IB-MAC pour un temps de simulation de 250 s.

Nous présentons en graphique les résultats obtenus :

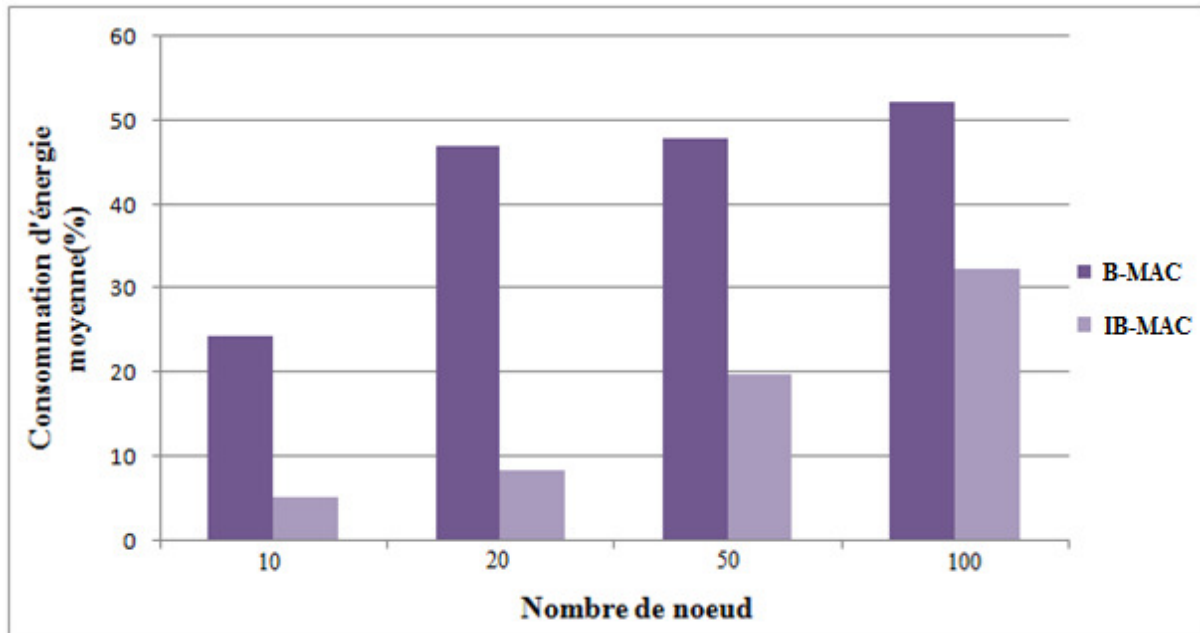


Figure 4.4 : La consommation d'énergie dans les RCSF pour les deux protocoles B-MAC et IB-MAC.

On remarque sur la **Figure 4.4** que la consommation d'énergie moyenne augmente avec l'augmentation de la densité du réseau pour les deux protocoles. Or, le IB-MAC consomme moins d'énergie par rapport au B-MAC car le temps de réponse offert par le protocole IB-MAC est meilleur que celui du protocole B-MAC.

De ce fait, on peut dire que les performances de IB-MAC en termes de consommation d'énergie sont largement supérieures à celles du protocole B-MAC.

6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'environnement de travail qui est le OMNeT++ puis à l'exposition des résultats de la simulation du protocole IB-MAC.

Nous avons comparé les performances de IB-MAC à celles du protocole B-MAC. Les résultats obtenus ont montré que le IB-MAC dépasse largement B-MAC en termes de

consommation énergétique. Or, il n'a pas vraiment gardé le bon fonctionnement du réseau puisque le taux de livraison des paquets transmis a largement diminué par rapport au B-MAC.

Nous pouvons dire que notre implémentation a contribué à réduire la consommation énergétique du réseau de capteurs mais il reste toujours un problème de collisions à résoudre.

Conclusion

Les réseaux de capteurs sont des types particuliers des réseaux de communication sans fil, ils ont été créés afin d'offrir des solutions pour la surveillance à distance et le traitement des données dans des environnements particuliers qui peuvent être inaccessibles ou hostiles.

L'énergie est la ressource la plus précieuse dans un réseau de capteurs, parce qu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et du réseau en entier. Plusieurs techniques ont été proposées afin de minimiser la consommation d'énergie.

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés à la technique à duty cycle pour améliorer le protocole B-MAC de la couche MAC en résolvant le problème de la sur-écoute dans le but d'étendre la durée de vie des capteurs et celle du réseau.

A travers notre recherche nous avons pu confirmer nos hypothèses à savoir :

- Résoudre le problème de la consommation énergétique ;
- Eviter au maximum les collisions.

Bien que les objectifs de cette recherche soient réussis, les résultats qu'elle nous a permis d'obtenir montrent que le problème de collision est toujours présent et ce dernier reste à résoudre.

Enfin, nous devons souligner que ce travail n'est qu'une simple tentative de répondre à l'un des problèmes rencontrés dans la communication sans fil. Nous souhaitons que d'autres recherches soient effectuées en proposant d'autres techniques qui contribueraient à développer notre réflexion.

Bibliographie

Articles

- 1) M.V. Ramana Rao, « Performance Evaluation of XMAC and BMAC Routing Protocol under Static and Mobility Scenarios in Wireless Sensor Network ». World Academy of Science, Engineering and Technology, 2015.
- 2) R. Meraihi, « Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ah hoc ». Ecole nationale supérieure des télécommunications Paris, 2003.

Sitographie

- 1) « CSMA/CA: Definition et explication de la methode ». Disponible sur :<<https://www.ionos.fr/digitalguide/serveur/know-how/csmaa-carrier-sense-multiple-access-with-collision-avoidance/>> (consulté le 27/01/2019)
- 2) « Etat de l'art sur les réseaux de capteur sans fil ». Disponible sur :<https://www.academia.edu/11334876/état_de_lart_sur_les_réseaux_de_capteurs_sans_fil> (consulté le 27/01/2019)

Mémoires consultés

- 1) BEKKAR Ilyes, « vers une explicitation des composantes d'un advisor de BD : Cas de selection des indexes ». Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2017, 107p.
- 2) SAFI Amel, « La simulation du protocole X-MAC pour les reseaux de capteurs sans fil ». Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2016, 34p .
- 3) GUNES Mesut, « Medium Access Control Protocols for Energy and Delay Efficient Applications of Wireless Sensor Networks ». Université des mathematiques et informatique Berlin, 2012.

Références Bibliographiques

- [1] Athmani Samir ; «Protocole de sécurité pour les réseaux de capteurs sans fil ». Thèse de Magistère ; Université de Hadj Lakhdar-Batna ; Juillet 2010.
- [2] I.F. AKYILDIZ et al : « Wireless Sensor Networks: A Survey ». Computer networks, 2002, 38, pp.393-422.
- [3] Belkhayer Sahraoui : « La Géo-localisation dans les reseaux de capteurs sans fil ». Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2011, 77p.
- [4] GAYE Malick, « Etat de l'art sur les WSN(Wirness Sensor Network) ». Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 2014, 45p. Disponible sur :< https://www.academia.edu/état_de_lart_sur_les_réseaux_de_capteurs_sans_fil > (consulté le 22/02/2019)
- [5] ACHAOUI Tinhinane, « Etude des modèles de mobilité dans RCSFs avec stationsde base mobiles ». Université A.Mira Bejaia, 2016, 57p.
- [7] CHALLAL Yacine, Réseaux de capteurs sans fils, « Modèle en couches ». Disponible sur :< https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_15.html>(consulté le 11/03/2019)
- [8] HELAILI Nabila, « Simulation du routage dans les reseaux de capteurs sans fil ». Université A.Mira-Bejaia, 2017, 48p.
- [9] BOUNEGTA Nadia,« Approche distribuée pour la sécurité d'un reseau de capteur sans fil ». Université de Bechar, 2010. Disponible sur :< https://www.memoireonline.com/08/10/3831/m_Approche-distribuee-pour-la-securite-dun-reseau-de-capteurs-sans-fils-RCSF1.html>(consulté le 10/02/2019)
- [10] HENNINI Hasnia, « La simulation du protocole Ri-MAC pour les réseaux de capteur sans fil ». Université Ibn Khaldoun-Tiaret, 2016, 47p.
- [11] CHALLAL Yacine, Réseaux de capteurs sans fils, « Modèle en couches ». Disponible sur :< https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/Module_RCSF_34.html>(consulté le 11/03/2019)
- [12] ACHAOUI Tinhinane, »Etude des modèles de mobilité dans RCSFs avec stationsde base mobiles ». Université A.Mira Bejaia, 2016, 57p.
- [13] NGOM Diery, « Optimisation de la duree de vie dans les reseaux de capteurs sans fils sous contrainte de couverture et de connectivité ». Université Cheikh Anta DIO de Dakar, 2016, 129p. Format PDF. Disponible sur :< <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01531464/document>> (consulté le 16/02/2019)
- [14] HENNINI Hasnia, « La simulation du protocole Ri-MAC pour les réseaux de capteur sans fil ». Université Ibn Khaldoun-Tiaret, 2016, 47p.

[15] BOUZELATA Houcine, « Étude sur la conservation de l'énergie au niveau MAC des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) et leur Simulation en utilisant le simulateur Castalia sur la plate forme OMNET++ ». Université Larbi Ben Mhidi-Oum El Bouaghi, 2015, 84p.

[16] RIFI Mounir, « Les protocoles de la couche MAC basés sur l'accès totalement déterministe pour les réseaux de capteurs sans fils ». Université de Casablanca, 2014, 04p. Format PDF. Disponible sur :<
https://www.researchgate.net/publication/283321538_les_protocoles_de_la_couche_MAC_base_sur_l'accès_totalement_deterministe_pour_les_reseaux_de_capteur_sans_fils> (consulté le 15/04/2019)

[17] « La consommation d'énergie au niveau de la couche liaison de donnée ». Format PDF. Disponible sur :<
http://perso.prism.uvsq.fr/~mogue/M2IRS/Biblio/Sensor/Sensor%20%20Net/french%20doc/MAC_d%C3%A9tail%C3%A9.pdf> (consulté le 29/01/2019)

[18] NGOM Diery, « Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fils sous contrainte de couverture et de connectivité ». Université Cheikh Anta DIO de Dakar, 2016, 129p. Format PDF. Disponible sur :< <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01531464/document>> (consulté le 16/02/2019)

[19] HENNINI Hasnia, « La simulation du protocole Ri-MAC pour les réseaux de capteur sans fil ». Université Ibn Khaldoun-Tiaret, 2016, 47p.

[20] DRIDI Khaled, « Spécification du Protocole MAC pour les Réseaux IEEE 802.11e à Différentiation de Services sous Contrainte de Mobilité ». Université Paris Est, 2011, 127.

[21] AYADI Ahmed, « Extensions du simulateur Omnet++ pour la validation de mécanismes de transmission multimédia dans les réseaux sans fils IEEE 802.11 ». Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique, Université de la Manouba, 2007. Disponible sur :<
<https://www.memoireonline.com/07/08/1359/extensions-simulateur-omnet-transmission-multimedia-reseaux-ieee-802-11.html>> (consulté le 27/03/2019)

[22] TAHAR CHAOUCH Amel, « Analyse par simulation des performances d'un réseau de capteurs sans fil (WSN) ». Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2016, 75p.

[23] « MIXIM ». Disponible sur :< <http://mixim.sourceforge.net/index.html> > (consulté le 27/03/2019)