

République Algérienne Démocratique Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'Ibn Khaldoun – Tiaret

Faculté des Mathématiques et de l'Informatique

Département Informatique

Thème

**La simulation du protocole RI-MAC
(Receiver-Initiated Medium Access Control)
pour les réseaux de capteurs sans fil**

Pour l'obtention du diplôme de Master II

Spécialité : Génie Informatique

Option : Système d'Information et Technologies Web

Réalisé par :

- Hennini Hasnia
- Djafri Faiza

Dirigé par :

- Mr. BENGHENI Abdelmalek

Année universitaire 2015-2016

Remerciements

*Nous remercions d'abord Dieu tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail. Nous tenons à remercier notre encadreur **Mr BENGHENI Abdelmalek** pour l'encadrement, l'apport scientifique, le soutien incommensurable et l'aide appréciable consentie. Nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, en particulier **Mr Mokhtari A.** Nos remerciements aux membres du jury, d'avoir accepté de juger notre travail.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers **parents** pour leur soutien, leur patience infinie et leurs précieux
conseils et encouragements,*

A mes frères et mes sœurs pour leur patience et inquiétude.

A mes très chers amis pour leur soutien et sympathie

Résumé

Il est devenu nécessaire, depuis quelques années, d'observer, de surveiller et de contrôler certains phénomènes physiques. Ceci a été rendu possible grâce à l'apparition des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs). Ces derniers sont des composants électroniques de petites tailles alimentés par batterie. Ils sont déployés en grand nombre dans des environnements généralement inaccessibles à l'homme afin de récolter des informations liées à ces environnements. Les données collectées par un capteur sont acheminées de voisin en voisin jusqu'à atteindre une station de base ou puits.

Le problème *de l'écoute à vide* est l'un des sources les plus significatives dans la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, et de beaucoup de techniques ont été proposés à base de la notion du *duty cycling* pour réduire ce coût. En ce mémoire, nous présentons le protocole asynchrone de duty cycle, appelé *Receiver-Initiated MAC* (RI-MAC).

L'objectif du protocole RI-mac est de réduire au minimum le temps que l'expéditeur et son récepteur prévu occupent le réseau sans fil et trouver un rendez-vous pour échanger les données, RI-mac à une performance plus élevée, un taux de livraison de paquet important, et une efficacité plus élevés de puissance et réduit la latence dans le réseau.

Mots-clé : réseau de capteurs sans fil (RCSF), MAC (Medium Access Control), RI_MAC (*Receiver-Initiated MAC*), duty-cycle, protocoles asynchrones.

Abstract

It has become necessary, in recent years, to observe, monitor and control certain physical phenomena. This was made possible thanks to the emergence of wireless sensor networks (WSNs). These are electronic components of small size battery powered. They are deployed in large numbers in environments generally inaccessible to man to collect information related to these environments. The data collected by a sensor are sent to neighbor neighbor until a base station or wells.

The problem of *listening with vacuum* is one of the most significant sources in energy consumption in wireless sensor networks, and many techniques have been proposed based on the concept of *duty cycling* to reduce this cost. In this brief, we present the asynchronous protocol *duty cycle*, called Receiver-Initiated MAC (MAC-RI).

The objective of the RI-mac protocol is to minimize the time that the sender and intended receiver occupy the wireless network and find a date for exchanging data, RI-mac to a higher performance rate important delivery package, and a higher power efficiency and reduces latency in the network.

Keyword Tags: wireless sensor network (WSN), MAC (Medium Access Control), RI_MAC (*Receiver-Initiated MAC*), duty-cycle, Asynchronous protocols.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil	
Introduction.....	4
1. Définition d'un capteur.....	4
1.1. Architecture matérielle d'un capteur.....	4
1.2. Définition d'un réseau de capteurs sans fil.....	6
1.3. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.....	6
1.4. Contraintes influençant les réseaux de capteurs sans fil.....	6
1.5. Les Domaines d'applications.....	7
1.6. La pile de communication (Pile protocolaire) [9].....	8
1.7. Comparaison entre les RCSFs et les réseaux Ad hoc classiques [10].....	12
1.8. Consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.....	12
1.9. Modèle de consommation d'énergie [25] :.....	14
Conclusion.....	16
Chapitre II Les protocoles MAC pour les réseaux de capteur sans fil	
Introduction.....	16
1. Définition.....	16
2. Les caractéristiques d'un protocole MAC convenable aux réseaux de capteurs [10].....	16
3. Classification des protocoles MAC proposés pour les réseaux de capteurs.....	18
3.1. L'allocation du canal radio.....	18
3.2. coordination entre les nœuds.....	19
3.3. La qualité de service.....	19
3.4. La notification.....	20
3.5. Les Protocoles Synchrones (S-MAC, T-MAC...).....	21
1. S-MAC.....	21
2. T-MAC.....	21
3.6. Les Protocoles asynchrone (B-MAC, Wise-MAC, X-MAC, RI-MAC...).....	22
1. B-MAC (Berkeley MAC).....	22
2. Le protocole Wise-MAC.....	23
3. Le protocole X-MAC.....	24
4. Le protocole Receiver-Initiated MAC (RI-MAC) [19].....	24
4. Propriétés souhaitées d'un protocole MAC bien défini.....	24

Chapitre III La description du protocole RI-MAC(Receiver-Initiated-MAC)

Introduction	27
1. Le Protocol RI-MAC	27
2. Intérêt de protocole RI-MAC	27
3. La structure du paquet de contrôle Beacon :	28
4. Le double rôle d'une beacon dans RI-mac.....	29
5. Les pannes de RI-MAC	30
5.1. Détection de collision et la retransmission.....	30
6. Beacon-Sur-Demande (Beacon-on-Request)	31
7. Transmissions de la trame de données par des expéditeurs opposés.....	31
8. Organigramme du Protocol RI-MAC.....	32
Conclusion :.....	33

Chapitre IV Evaluation des Résultats de Simulation

Introduction	35
1. L'environnement utilisé.....	35
2. Définition de Matlab	35
3. Les particularités de MATLAB.....	35
4. L'implémentation	36
4.1. Les paramètres utilisés de simulation.....	36
4.2. Les métriques de performance.....	36
4.3. Fonctionnement du simulateur réalisé.....	37
4.4. Bloc fonctionnel du simulateur	37
4.5. La description du Simulateur et les résultats de simulation :	38
a) L'interface principale :	38
b) Déploiement des nœuds de capteurs.....	39
c) Découverte la liste des voisins	40
d) Le déroulement du protocole RI-MAC :	40
Conclusion	43
La Bibliographie.....	46
Webographie	47

Liste des figures

Figure 1 : Architecture matérielle d'un capteur [3]	4
Figure 2 : Architecture d'un réseau de capteurs sans fils [23].....	4
Figure 3 : Pile protocolaire pour RSCF [3]	4
Figure 4 : Répartition de la consommation d'énergie dans un capteur.....	4
Figure 5 : Modèle de consommation d'énergie	14
Figure 6 : Exemple de répartition de slots avec un protocole MAC synchronisé [12]	21
Figure 7 : le cycle « écoute/veille » périodique du S-MAC [16].	16
Figure 8 : Séquencèrent des périodes d'écoute et de sommeil de T-MAC et de S-MAC [16]	16
Figure 10 : Le protocole Wise-MAC.....	24
Figure 9 : Protocole B-MAC [10].....	16
Figure 11 : le protocole RI-MAC [19]	28
Figure 12 : la forme du paquet beacon dans RI-mac [19]	27
Figure 13 : Le double rôle d'une beacon dans RI-mac. [19].....	27
Figure 14 : Beacon-on-Request [19].....	31
Figure 15 : Organigramme de RI-MAC (comportement au niveau d'un nœud)	27
Figure 17 : Schéma du bloc fonctionnel du simulateur réalisé.....	37
Figure 16 : Fonctionnement du simulateur réalisé.....	35
Figure 18 : L'interface principale de notre simulateur	38
Figure 20 : Le déploiement aléatoire des nœuds de capteur.....	40
Figure 19 : Le déploiement des nœuds de capteurs se forme une grille.....	35
Figure 21 : La liste des nœuds voisins.....	40
Figure 22 : L'énergie moyenne consommée par rapport au nombre d'itération	42
Figure 23 : L'énergie consommée par plusieurs simulations en variant le nombre de nœuds	42
Figure 24 : la latence par nombre des nœuds	43

Liste des tableaux

Tableau 1 : comparaison entre Rscfs et Réseaux ad hoc.....	12
Tableau 2 : Liste des abréviations utilisées dans l'organigramme de la figure 15.....	32
Tableau 3 : Les paramètres utilisés pour la simulation de protocole RI-MAC.....	36

Liste des abréviations

CAN	Convertisseur Analogique/Numérique
IP	Internet Protocol
WLAN	Wireless Local Network Area
QOS	Quality Of Service
RTS	Request To Send
CTS	Clear To Send
FRTS	Future Request To Send
OSI	Open Systems Interconnection
ACK	Accusé de réception.
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CRM	Collision Recovery Mechanism
S-MAC	Sensor-MAC.
SB	Station de Base.
TDMA	Time Division Multiple Access. .
MAC	Media Access Control.
FEC	Forward Error Correction
RI-MAC	Receiver-Initiated MAC
T-MAC	Timeout MAC
B-MAC	Berkeley MAC
Wise-MAC	Wireless Sensor MAC
X-MAC	A Short Preamble MAC
SFD	Start of Frame Delimite
FRTS	Future Request To Send

Introduction Générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) viennent au secours de l'environnement et de l'industrie grâce aux récents développements réalisés ces dernières années dans les domaines de la microélectronique et des technologies sans fil (Wireless). Réalisés à partir de petites entités électroniques, ils représentent aujourd'hui une solution crédible quand il s'agit d'observer, de contrôler et éventuellement de traiter des phénomènes physiques tels que la température, la pression, les mouvements ou encore la luminosité. Les applications dédiées à de tels réseaux sont nombreuses et de plus en plus variées, allant de la défense à la surveillance, de la santé à l'environnement et le commerce [1]. Les constituants (ou nœuds) de ces réseaux sont généralement déployés en grand nombre en vue de collecter et de transmettre des données environnementales, d'une manière autonome, vers un ou plusieurs points de collecte. Les caractéristiques de ces nœuds impliquent diverses contraintes en matière de puissance de calcul, d'espace de stockage mémoire, d'énergie et de communication. Les nœuds dans un RCSF sont souvent amenés à opérer dans des milieux difficiles d'accès, ceci rendant leur recharge en énergie délicate, voire impossible. Dans les WSN, la consommation d'énergie est une contrainte très cruciale puisque généralement les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile voire impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau en entier. La majorité des travaux de recherche menés actuellement se concentrent principalement sur les moyens de réduire au minimum l'énergie consommée dans la communication de données de sorte à maximiser la durée de vie du réseau.

Pour prolonger la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil tout en assurant les trois tâches principales d'un nœud capteur : capture, traitement et l'envoi des données, il faut bien conserver l'énergie des nœuds capteurs. Parmi ces trois tâches, l'envoi des données ou la communication est la tâche qui consomme la plus grande partie de l'énergie. Ceci a motivé des travaux de recherche à se focaliser sur la couche MAC (Medium Access Control) et réseau. Dans notre travail, nous nous intéressons à la couche MAC. Le protocole MAC doit être utilisé efficacement pour prendre en considération la contrainte d'énergie dans les réseaux de capteurs. En fait, la tâche du protocole MAC dans ces réseaux est de permettre aux nœuds capteurs de partager le canal équitablement et efficacement mais surtout en minimisant la consommation d'énergie en évitant les principales causes de consommation d'énergie : les

Introduction Générale

collisions, l'écoute à un canal libre, l'overhearing, l'overhead et les fréquentes transitions entre les modes "en veille" et "activité".

De ce fait, notre objectif est de simuler le comportement de ces nœuds capteurs par l'implémentation du protocole RI_MAC (**Receiver-Initiated MAC**) dont la transmission est initiée par le récepteur, elle est plus économe en énergie par rapport aux autres protocoles.

Pour mener à bien notre travail, nous l'avons organisé en quatre chapitres selon un plan méthodologique suivant :

Dans le premier chapitre, nous exposons les concepts généraux relatifs au domaine des Réseaux de capteurs sans fil. Le deuxième chapitre présente l'étude bibliographique sur les protocoles MAC, quelques détails sur la classification des protocoles MAC et leurs caractéristiques. Une étude détaillée sur le protocole RI-MAC est l'objectif du troisième chapitre. Le quatrième chapitre présente l'évaluation et l'analyse des résultats trouvés après l'implémentation du protocole RI-MAC par la création de notre simulateur sous MATLAB.

Chapitre I

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

Introduction

Au cours des dernières décennies, nous avons assisté à une miniaturisation du matériel informatique. Cette tendance à la miniaturisation a apporté une nouvelle génération de réseaux informatiques et télécoms présentant des défis importants et produisant en masse des systèmes d'une taille extrêmement réduite et embarquant des unités de calcul et de communication sans fil pour un coût réduit. Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des technologies visant à résoudre les problèmes de cette nouvelle technologie de l'informatique embarquée, ils sont capables de générer et d'échanger des données d'une manière autonome et complètement transparente pour les utilisateurs [2].

Dans ce chapitre nous allons introduire et faire une description synthétique des réseaux de capteurs sans fil en présentant leurs évolutions, architectures, contraintes et leurs domaines d'applications variés.

1. Définition d'un capteur

Un capteur sans fil est un composant physique autonome, doté de moyens de traitement et de communication de l'information [1].

1.1. Architecture matérielle d'un capteur

Un capteur est composé principalement d'une unité de : captage, traitement, stockage, communication, et d'énergie. Des composants additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine d'application [3], comme par exemple un système de localisation tels qu'un GPS (Global Positioning System), un générateur d'énergie (exemple : cellules solaires) ou un mobilisateur lui permettant de se déplacer (Figure 1).

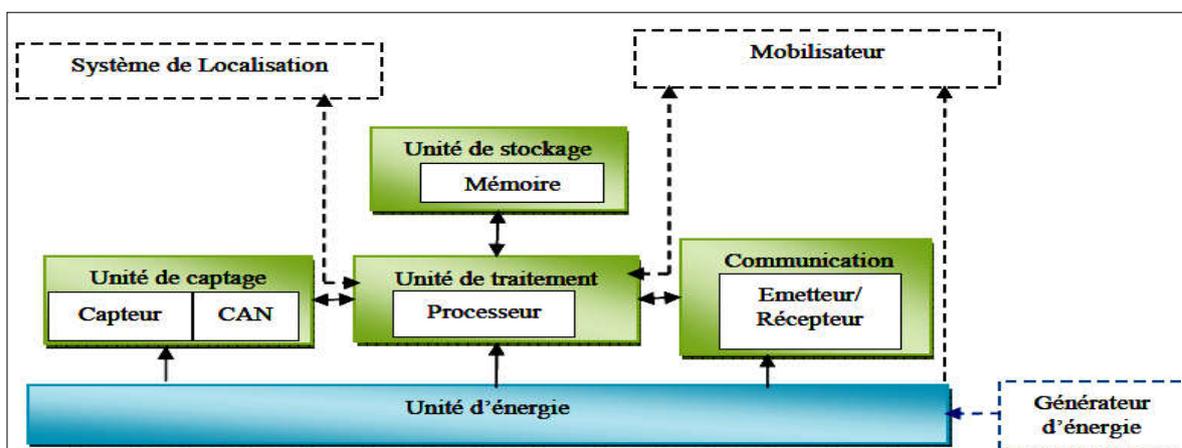


Figure 1 : Architecture matérielle d'un capteur [3]

▪ **Unité d'énergie**

Un capteur est muni d'une source d'énergie, généralement une batterie, pour alimenter tous ses composants. Les batteries utilisées sont soit rechargeables ou non. Souvent, dans les environnements sensibles, il est impossible de recharger ou changer une batterie. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et donc d'un réseau de capteurs.

▪ **Unité de captage**

La fonction principale de l'unité de captage est de capturer ou mesurer les données physiques à partir de l'objet cible. Il est composé de 2 sous-unités : le récepteur (reconnaissant la grandeur physique à capter) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au convertisseur Analogique/Numérique(CAN). Ce dernier transforme ces signaux en données numériques et les transmet à l'unité de traitement. Un capteur peut avoir un ou plusieurs unités de captage [4].

▪ **Unité de traitements (processeur)**

Il recueille des données de l'unité de captage ou d'autres capteurs, effectue un traitement sur ces données (si nécessaire) et décide quand et où les envoyer. Il doit exécuter des programmes et des protocoles de communication différents. Les types de processeurs qui peuvent être utilisés dans un capteur incluent le Microcontrôleur, les DSP (Digital Signal Processors), les FPGA (Field Programmable Gate Array) et les ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Parmi toutes ces alternatives, le Microcontrôleur a été le processeur le plus utilisé pour les capteurs à cause de sa flexibilité à être reliés à d'autres composants (Comme par exemple l'unité de communication), à son bon prix et sa faible consommation énergétique [4].

▪ **Unité de communication**

Cette unité est responsable de toutes les émissions et réceptions de données via un support de communication sans fil. Les différents choix de média de transmission incluent la Radiofréquence (RF), le Laser et l'Infrarouge [4].

▪ **Unité de stockage(Mémoire)**

L'unité de stockage inclut la mémoire de programme (dont les instructions sont exécutées par le processeur) et la mémoire de données (pour conserver des données fournies par l'unité de captage et d'autres données locales). La taille de cette mémoire est souvent limitée

essentiellement par les considérations économiques et s'améliorera aussi probablement au fil des années [4].

1.2. Définition d'un réseau de capteurs sans fil

Est un réseau ad hoc avec un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome. La position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée. Ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique, appelée « *champ de captage* » correspondant au terrain d'intérêt pour le phénomène capté [5].

1.3. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Un RCSF consiste en un grand nombre de capteurs (des centaines voire des milliers) déployés en densité dans un terrain d'intérêt dit « zone de captage ». Ces capteurs ont la capacité de collecter les données sur le phénomène surveillé et les transmettre par l'intermédiaire d'un routage multi-sauts vers un nœud spécial appelé « puits » ou « station de base » (en anglais : Sink). Ce dernier transmet ensuite les informations collectées via Internet ou bien satellite à un ordinateur dit « Gestionnaire de tâches » accessible par l'utilisateur (voir la Figure 2).

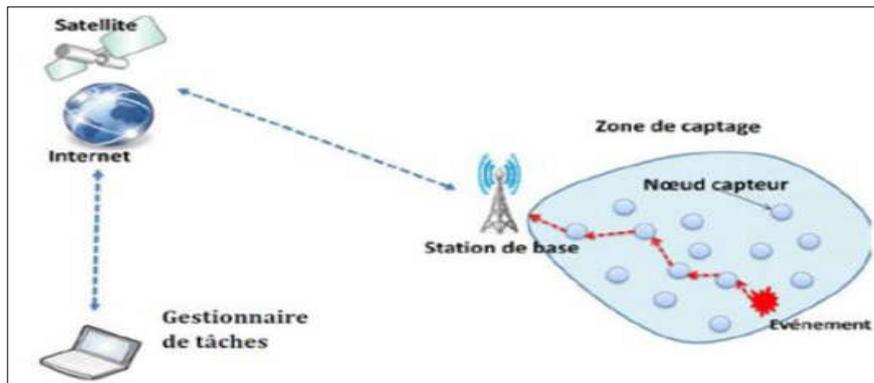


Figure 2 : Architecture d'un réseau de capteurs sans fils [23]

1.4. Contraintes influençant les réseaux de capteurs sans fil

Créer des protocoles nécessitant l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil ou bien contribuant dans leur développement reste un problème difficile pour les raisons suivantes [6]:

a. Capacité limitée

Non seulement les ressources de calcul et de mémoire des nœuds sont relativement faibles, mais en plus, ils opèrent avec des piles ce qui rend leur durée de vie limitée, un protocole efficace et réaliste doit minimiser au maximum l'overhead de communication et de stockage pour ne pas pénaliser le réseau.

b. Agrégation de données

Il a été démontré dans plusieurs publications scientifiques que le fait d'agréger les données avant de les envoyer à une station de base va permettre de diminuer le nombre de messages envoyés, de réduire les puissances d'émission et ainsi économiser de l'énergie.

c. Echelle de dynamicité

Les réseaux de capteurs contiennent souvent un nombre de nœuds très important. Ces réseaux sont souvent peu stables et très dynamiques : les capteurs, qui ont épuisé leur pile, disparaissent et de nouveaux nœuds doivent être déployés pour assurer une certaine connectivité.

d. Protection physique faible

Les capteurs sont souvent déployés dans des environnements non-protégés (montagnes, forêts, champs de bataille,...). Par conséquent, ils peuvent facilement être interceptés et corrompus. De plus, à cause de leur faible coût, ils utilisent rarement des composants électroniques anti-corruption (tamper-resistant devices).

1.5. Les Domaines d'applications

La diminution de taille et de coût des micro-capteurs, l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations...) et l'évolution des supports de communication sans fil, ont élargi le champ d'application des réseaux de capteurs [8]. Ils s'insèrent notamment dans d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage. Ils permettent de collecter et de traiter des informations complexes provenant de l'environnement (météorologie, étude des courants, de l'acidification des océans, de la dispersion de polluants, etc.

a. Applications militaires [7]

Les RCSFs peuvent être utilisés dans le cadre militaire, par exemple, pour :

- Contrôler des forces, des équipements et des munitions.
- Analyser et surveiller un champ de bataille.
- Détecter et poursuivre des objets ennemis.
- Protéger des éléments sensibles comme les bases nucléaires et les ponts.
- Détecter et reconnaître des attaques nucléaires, biologiques et chimiques.

b. Applications à la sécurité [1]

Chapitre I : Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité pourrait diminuer considérablement les budgets consacrés à la sécurisation des lieux et à la protection des êtres humains tout en garantissant des résultats plus fiables. Comme exemples de ce type d'applications, on peut citer :

- La détection des altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou au vieillissement, par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton.
- La protection des barrages par la détection prompte des fuites d'eau.

c. Application médicales (santé) [8]

Le champ de contrôle de santé (Health monitoring) représente un grand marché pour les réseaux de capteurs sans fil qui a tendance à croître très rapidement. Ces réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain (surveillance de la glycémie, détection de cancers, ..) grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau. Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques telles que : la tension artérielle, le rythme cardiaque, ... à l'aide des capteurs ayant chacun une tâche bien particulière.

d. Les applications industrielles [1]

Grâce à leur grande flexibilité, les réseaux de capteurs sont largement utilisés dans le champ industriel. Parmi les cas d'utilisations, on cite :

- le suivi et le control du procédé de production pour assurer une meilleure qualité de service.
- La protection contre les catastrophes industrielles en assurant un suivie efficace des équipements et produits sensibles tout en détectant précocement les problèmes.

1.6. La pile de communication (Pile protocolaire) [9]

La volonté de ne pas favoriser un industriel, la prise en compte de l'hétérogénéité des équipements, et la possibilité d'une évolution et d'une adaptation facile ont nécessité l'adoption de règles communes de communication et de coopération entre les équipements. Ces règles forment un protocole de communication. Traditionnellement, la pile protocolaire utilisée dans le monde des réseaux est organisée suivant un modèle en couches superposées l'une sur l'autre. Chaque couche assure de manière indépendante une partie des fonctionnalités nécessaires à la communication entre les entités du réseau. Elle utilise les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur.

Chapitre I : Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil

Différents des réseaux ad hoc traditionnels, les réseaux de capteurs exigent des nouvelles limitations pour la conception des protocoles de communication. Ces protocoles doivent prendre en compte des contraintes de conception propres aux RCSFs. Le modèle OSI (Open Systems Interconnexion) de l'ISO (International Standardization Organization) ne suffit donc plus.

La pile protocolaire [3] utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par (Figure 3). Ce modèle comprend 5 couches (une couche application, une couche transport, une couche réseau, une couche liaison de données, une couche physique) qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI, ainsi que 3 niveaux (plans) qui sont : un plan de gestion d'énergie, un plan de gestion de mobilité et un plan de gestion des tâches

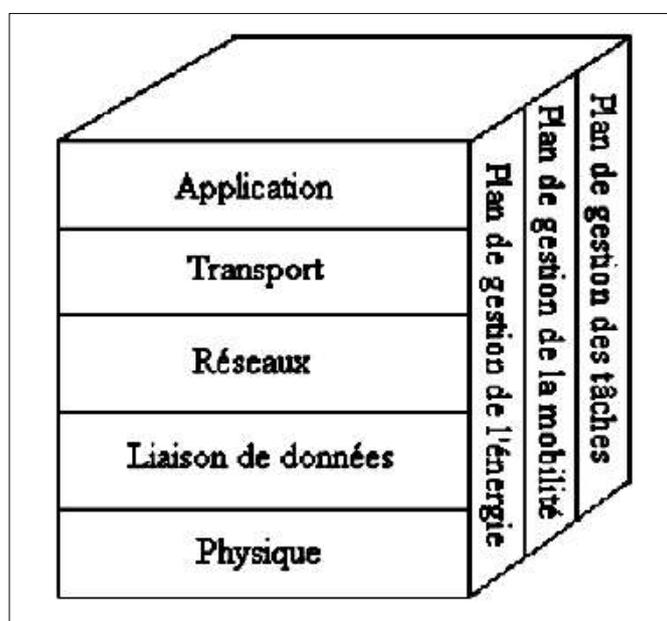


Figure 3 : Pile protocolaire pour RCSF [3]

- **La couche physique** : La couche physique est responsable de :

- La sélection des fréquences porteuses.
- La détection du signal.
- La modulation.

- **Couche liaison de données**

En générale, cette couche est responsable du multiplexage du flux de données, de la détection et le verrouillage des trames de données, du contrôle d'accès aux média (MAC: Media Access Control), et du control des erreurs. Elle assure une connexion fiable (point -à - point ou point-à-multipoints) selon la topologie du réseau de capteurs.

- **Couche réseau**

Chapitre I : Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil

Le but principal de la couche réseau est de trouver une route et une transmission fiable des données, captées, des nœuds capteurs vers le puits en optimisant l'utilisation de l'énergie des capteurs. Les caractéristiques spécifiques aux RCSFs exigent que leurs protocoles de routage diffèrent de ceux des réseaux ad hoc traditionnels.

- La couche transport

Cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

- La couche application

La couche application constitue l'ensemble des applications implémentées sur un réseau de capteurs. Ces applications doivent fournir des mécanismes permettant à l'utilisateur d'interagir avec le réseau de capteurs à travers différentes interfaces, et éventuellement, l'intermédiaire d'un réseau étendu (par exemple ; Internet). Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.

Quant aux niveaux (plans) intégrés dans la pile protocolaire, ils ont les fonctions suivantes :

- Le plan de gestion d'énergie

Un nœud de capteur sans fil, nécessite seulement une source d'énergie limitée ($< 0.5\text{Ah}$, 1.2 V). La vie du nœud montre, une dépendance forte à l'égard de la vie de la batterie. Le plan de gestion d'énergie doit gérer la manière dont les nœuds utilisent leurs énergies. Par exemple le nœud doit se mettre en sommeil après la réception d'un message à partir d'un voisin afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus.

- **Le plan de gestion de mobilité** : Puisque les nœuds peuvent être mobiles, un système de gestion de mobilité doit exister. Un tel système doit être capable d'enregistrer les mouvements du nœud afin de l'aider à se localiser.

- Plan de gestion de tâche :

Lors d'une opération de captage 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 l'équilibrage et la distribution des tâches 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.

1.7. Comparaison entre les RCSFs et les réseaux Ad hoc classiques [10]

les RCSFs	les réseaux Ad hoc
Utilisation d'un médium sans fil.	Utilisation d'un médium sans fil.
Déploiement ad hoc.	Déploiement ad hoc
Robuste aux pannes des nœuds (auto-organisation).	Robuste aux pannes des nœuds (auto-organisation).
Routage multi-saut.	Routage multi-saut.
La mobilité des nœuds est restreinte.	La mobilité des nœuds.
Grand nombre de nœuds (de l'ordre de mille).	Nombre de nœuds moyen (de l'ordre de cents).
Les nœuds ont une basse capacité de traitement et de stockage.	Les nœuds ont une grande capacité de traitement et de stockage.
Les nœuds collaborent pour remplir un objectif.	Chaque nœud a son propre objectif.
Flot de données « many-to-one ».	Flot de données « any-to-any ».
L'énergie est un facteur déterminant.	Le débit est majeur.
Utilisation du Broadcast.	Communication point à point.
Data-centric : souvent pas d'adresses uniques, les requêtes sont envoyés à tous les nœuds.	Adress-centric : une adresse unique pour chaque nœud utilisée pour réaliser la communication entre les nœuds.

Tableau 1 : comparaison entre Rcsfs et Réseaux ad hoc

1.8. Consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes : la capture, le traitement et la communication de données [11].

1.8.1. Energie de capture

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

1.8.2. 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.

1.8.3. 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 l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur.

1.8.4. Le niveau de gestion d'énergie

Un capteur est doté généralement d'une ressource énergétique limitée sous forme d'une batterie standard de basse tension ($< 0.5 \text{ AH}$, 1.2 V). Dans la plus part des cas, il est impossible de recharger ou de remplacer cette batterie. Ainsi, la durée de vie d'un nœud va dépendre fortement de sa consommation d'énergie.

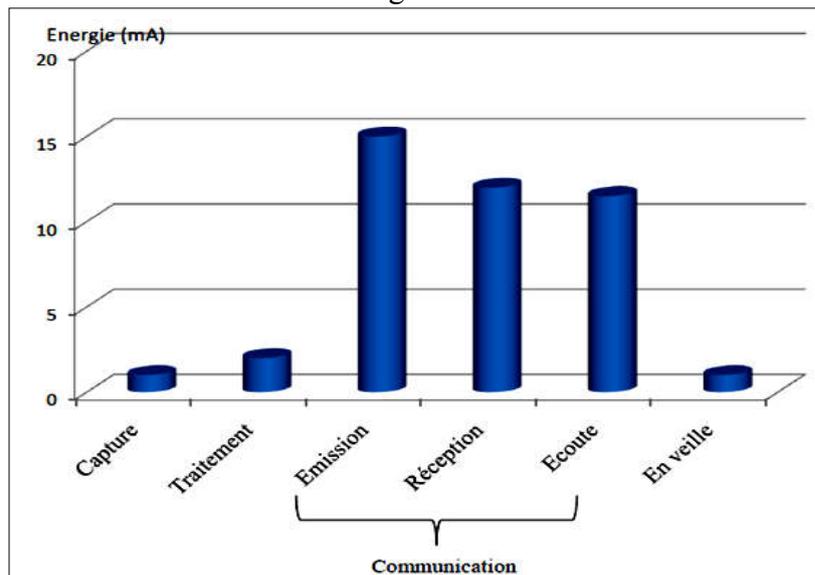


Figure 4 : Répartition de la consommation d'énergie dans un capteur

La figure 4 illustre la répartition de la consommation d'énergie au sein d'un capteur. On constate que les opérations de communication consomment la plus grande quantité d'énergie. C'est pour cela, maximiser la conservation d'énergie lors de la communication va augmenter,

de façon très significative, la durée de vie du capteur. De manière générale, le niveau de gestion d'énergie adopte des mécanismes pour contrôler et essayer d'optimiser l'énergie consommée par les capteurs tels que : la mise en veille après la réception d'un message ; la non-participation au routage des nœuds qui atteignent un seuil critique d'énergie.

1.9. Modèle de consommation d'énergie [25] :

Heinzelman et al. Proposent un modèle radio de consommation d'énergie (figure 5). Ainsi, les énergies nécessaires pour émettre $E_{Tx}(k, d)$ et recevoir $E_{Rx}(k)$ des messages sont données par :

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

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx}(k) + E_{Tx_amp}(k, d) \quad (1)$$

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} E_{elec}(k, d) + k * \epsilon_{amp} * d^2 & \text{Si } d < d_{crossover} \\ k * E_{elec}(k, d) + k * \epsilon_{amp} * d^4 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (2)$$

- Pour recevoir un message de k bit, le récepteur consomme :

$$E_{Rx}(k) = k * E_{elec} \quad (3)$$

Avec :

E_{elec} : énergie de transmission/réception électronique.

k : taille d'un message.

d : distance entre l'émetteur et le récepteur.

E_{Tx_amp} : énergie d'amplification.

ε_{amp} : facteur d'amplification.

d : distance limite pour laquelle les facteurs de transmission changent de valeur.

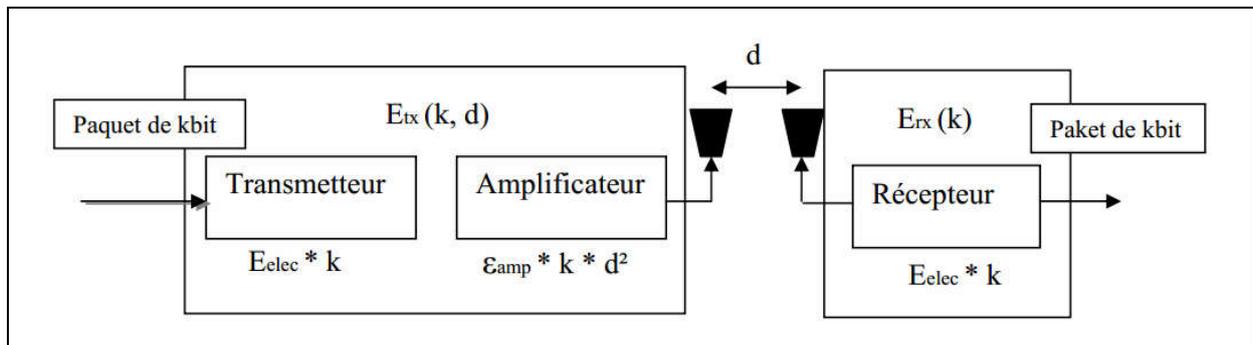


Figure 5 : Modèle de consommation d'énergie

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué bien que brièvement la notion de capteur, de réseaux de capteurs sans fil et leur architecture.

Cela nous a permis de découvrir les multiples domaines d'utilisation de ces derniers vu la facilité de déploiement et du faible cout des capteurs, sans pour autant oublié les contraintes auxquelles doit faire face n'importe quel protocole travaillant sur ces capteurs surtout celle concernant « la limitation de l'énergie » qui est une ressource qu'il faut gérer.

Chapitre II

Les protocoles MAC pour les réseaux de capteur sans fil

Introduction

Les réseaux de capteurs diffèrent des réseaux sans fils traditionnels sur plusieurs plans. En premier lieu, les nœuds capteurs sont dotés de petites batteries qui sont généralement difficile à changer ou à recharger ce qui limite leur durée de vie. En second lieu, les nœuds capteurs sont déployés d'une manière aléatoire (avion, missile...) et c'est à eux de s'auto-organiser au sein du réseau.

En troisième lieu, différents types d'application (militaire, surveillance...) requièrent un nombre très grand de nœuds capteurs dont la densité peut atteindre (20 nœuds/m³).

Finalement, les informations transmises au sein du réseau, qui se basent sur des captures (Mesure de température, déplacement...) du phénomène étudié, peuvent entraîner un trafic très volumineux.

Ce chapitre introduit les fonctions assumées par la couche de contrôle d'accès au médium (Medium Access Control (MAC)). Nous présenterons dans un premier temps la définition de la couche MAC et nous continuerons par la description des principales caractéristiques et classification des protocoles MAC proposés pour les réseaux de capteurs sans fil et quelques protocoles MAC (T-MAC, S-MAC, B-MAC, RI-MAC...).

1. Définition

La couche MAC est une sous-couche de la couche liaison de données (couche 2) du modèle OSI (Open System Interconnection) [12]. Les protocoles appartenant à cette couche sont chargés de coordonner l'accès au médium de communication qui peut être partagé par de nombreux nœuds. Un protocole MAC conçu pour les réseaux de capteurs sans fil doit donc décider à quel moment un nœud doit entrer dans l'une des trois phases suivantes : mise en veille, transmission et écoute / réception. Ces différentes phases doivent s'alterner tout en essayant de fournir un accès fiable, une faible latence et un débit équitable pour tous les nœuds. Atteindre ces conditions est d'autant plus difficile compte tenu des caractéristiques du médium radio. Le médium sans fil est half-duplex, ce qui signifie qu'un nœud ne peut pas simultanément transmettre et réceptionner des données.

2. Les caractéristiques d'un protocole MAC convenable aux réseaux de capteurs [10]

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

2.1. Optimisation d'énergie

Cette propriété est la plus importante de toutes dans le cas des RCSFs (D'ailleurs la majorité des recherches dans ce domaine creusent dans la problématique de la consommation d'énergie). 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.

2.2. 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 vues la nature des réseaux de capteurs (déploiement aléatoire, environnement non assuré...)

2.3. 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.

2.4. la 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.

2.5. Latence [13]

Parfois appelée délai, est le temps que prend une trame (ou un paquet) pour voyager entre la station d'origine et la destination finale sur le réseau.

2.6. Throughput

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.

2.7.Équité (Fairness)

Elle reflète la capacité des nœuds capteurs à partager le canal d'une façon équitable. Dans le cas des WSN, cette propriété n'est pas prise en considération étant donné que tous les nœuds collaborent ensemble, indépendamment de la quantité d'informations émises par les différents nœuds, afin de remplir une tâche commune.

Cependant, cette propriété est très importante dans les réseaux traditionnels du fait que chaque nœud désire avoir la même chance que les autres nœuds pour l'émission ou la réception des données.

3. Classification des protocoles MAC proposés pour les réseaux de capteurs

Pour cette classification, nous sommes basés sur les critères suivants :

3.1. L'allocation du canal radio

Dans les communications radio fréquence, s'il existe plus qu'un nœud qui veut transmettre des données sur le même canal et en même temps, alors des problèmes de communication tels que les collisions ou la distorsion, peuvent surgir.

Afin d'éviter de tels problèmes, une partie de la bande passante est allouée à chaque nœud. Cette allocation peut être soit statique, soit dynamique :

a. **Allocation statique** : cette technique d'allocation divise la bande passante en N parties, chaque partie est allouée à un nœud.

En général, les protocoles MAC dans les WSN, qui emploient une allocation statique du canal, utilisent la technique TDMA.

Cette technique requiert une synchronisation entre les nœuds afin de permettre à chaque nœud d'identifier ces slots de temps. La synchronisation peut être soit centralisée, soit distribuée:

- **Synchronisation centralisée** : Un nœud capteur jouant le rôle d'un point d'accès (AP) envoie périodiquement un signal de synchronisation à tous les nœuds.

(Cette technique n'est pas applicable dans les WSN car ce genre de réseau souffre d'un temps d'attente élevé et une perte de paquets assez fréquente. Donc, dans le cas d'un retard ou d'une perte du signal de synchronisation, le réseau sera perturbé.)

- **Synchronisation distribuée** : Chaque nœud ou groupe de nœuds génère son propre Schedule. L'utilisation de plusieurs « Schedule » peut causer des « clockdrifts » (dérives d'horloges) ce qui entraîne la perte de synchronisation, c'est pour cette raison que les «Schedule» doivent être périodiquement ajustés. (Malgré ce problème de «clockdrifts»,

cette technique est applicable par quelques protocoles MAC dans les WSN, qui assurent que l'intervalle de transmission soit très large par rapport au « clock drift ».

b. **Allocation dynamique** : Dans cette technique, il n'existe pas de bande passante allouée pour chaque nœud. Tout nœud voulant accéder au canal doit gagner la contention.

Avec ce type d'allocation, il existe une probabilité de collision. En effet, un nœud A (du fait que la communication est en half-duplex) ne peut pas écouter le canal pour vérifier si un autre nœud B a transmis des données en même temps que lui. Ainsi le nœud A (émetteur) ne pourra pas déterminer si une collision a eu lieu ou pas.

3.2. coordination entre les nœuds

Afin d'éviter les collisions, les nœuds doivent coordonner ensemble, pour accéder au canal, en suivant l'une des méthodes suivantes :

- a) **Méthode aléatoire** : Avant d'émettre ses données, le nœud écoute le canal. Si ce dernier est occupé, alors le nœud doit retarder son émission, sinon il émet ses données. Cette méthode est aussi appelé CSMA (Carrier Sense Multiple Access).
- b) **Méthode planifiée ou « scheduled »** : La transmission s'effectue lors de slots prédéterminés. Cette méthode est utilisée dans les protocoles à allocation de canal statique.
- c) **Méthode hybride** : Chaque nœud X possède un slot prédéterminé pour recevoir les données. Cependant un nœud Y désirant émettre des données vers X, doit entrer en compétition avec les autres nœuds pour transmettre ses données lors du slot prédéterminé de X. Les protocoles SMAC et TMAC emploient cette méthode

3.3. La qualité de service

Contrairement aux réseaux traditionnels, là où la qualité de service est basée sur la bande passante, la latence, le bruit..., Dans les WSN, il existe plusieurs challenges liés à la QOS auquel on doit tenir compte tels que la consommation d'énergie, les contraintes matérielles (Les limitations de ressources peuvent influencer sur la QOS), le bruit...

Les techniques QOS dans les protocoles MAC peuvent être classifiées de la manière suivante:

- a. **Packet reordering** : cette technique est basée sur un algorithme qui réordonne les paquets entrants dans le buffer du nœud selon leurs priorités. Cette technique est aussi utilisée par IEEE 802.11e qui ordonne les paquets entrants selon des classes de priorité.
- b. **Medium Access prioritisation** : cette technique est basée sur un algorithme permettant aux paquets les plus prioritaires d'accéder au canal. Elle est utilisée

aussi bien par IEEE802.11e (cas d'EDCF) que par IEEE 802.15.4 en mode super frame.

- c. **Admission Control** : cette technique est basée sur un algorithme qui contrôle la quantité de données qu'un nœud pourrait émettre dans un période bien déterminée.

3.4. La notification

Afin de réussir la communication entre émetteur et récepteur, ce dernier doit être à l'écoute du canal au moment où la transmission commence. Ainsi, il sera notifié de l'existence d'une transmission sur le canal. Cette notification peut être classée en deux types :

- a. **Par réservation** : Ce type de notification est utilisé par les protocoles basés sur une allocation statique du canal, là où les nœuds possèdent des slots prédéterminés pour l'émission ou la réception.
- b. **Par écoute du canal** : Un nœud peut être toujours à l'écoute du canal en attente de recevoir une transmission qui lui est destinée. Malgré que cette méthode d'écoute puisse augmenter les chances de réception du message, cette méthode est trop coûteuse en énergie. (L'idéal c'est que les nœuds activent leurs radios au moment d'une transmission).

Afin d'éviter de telles pertes, les nœuds changent périodiquement d'états (actif ou endormi) selon un cycle appelé « duty-cycle ». L'écoute du canal peut être synchrone ou asynchrone :

- i. **Synchrone** [14] : 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.

Les protocoles MAC synchronisés résolvent le problème de synchronisation en divisant le temps en intervalles pour tous les nœuds du réseau. Ces protocoles peuvent être divisés en deux catégories. La première catégorie divise le temps en plusieurs intervalles discrets, appelés slots. Cette catégorie se base donc sur le principe de Time Division Multiple Access (TDMA) et requiert une forte synchronisation globale.

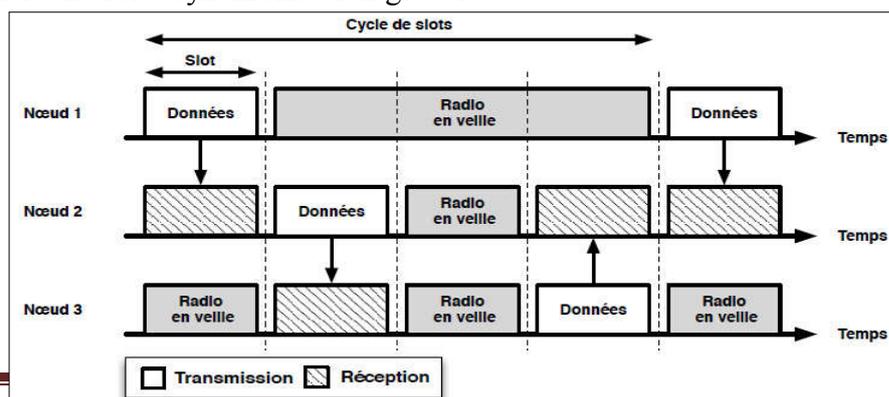


Figure 6 : Exemple de répartition de slots avec un protocole MAC synchronisé [12]

Entre tous les nœuds. Un nœud va s'accorder avec ses voisins pour déterminer l'usage qu'il fera des slots qui lui ont été attribués (émission ou réception). Durant le reste du temps, sa radio sera en veille afin d'économiser de l'énergie. La Figure 4 illustre cette répartition. Les protocoles MAC TRAMA [15]. L'avantage de ces protocoles est l'absence de collision car seul un émetteur est actif durant un slot. La seconde catégorie utilise une synchronisation locale et alterne des phases de sommeil et d'activité. Ces phases sont périodiques et le début de chaque phase d'activité est synchronisé localement entre les nœuds du voisinage. Durant la phase de sommeil, la radio est en veille, ce qui permet d'économiser de l'énergie. Durant la phase d'activité, les nœuds accèdent au médium librement. Contrairement aux protocoles de la première catégorie, les nœuds sont en compétition pour transmettre leurs informations et utilisent la méthode CSMA/CA pour accéder au médium.

3.5. Les Protocoles Synchrones (S-MAC, T-MAC...)

1. **S-MAC** [16] Les modes écoute et veille périodiques dans le protocole S-MAC sont conçus pour réduire la consommation énergétique. L'idée fondamentale est illustrée par la figure 6. Chaque nœud passe en mode veille pour un certain temps et se réveille pour vérifier si ses nœuds voisins veulent lui communiquer un paquet. Quand un nœud est en mode veille, il éteint son radio et initialise un temporisateur pour se réveiller plus tard. Le frame dans S-MAC est subdivisée équitablement sur les deux périodes ce qui veut bien dire que le facteur taux d'activité = 50%.

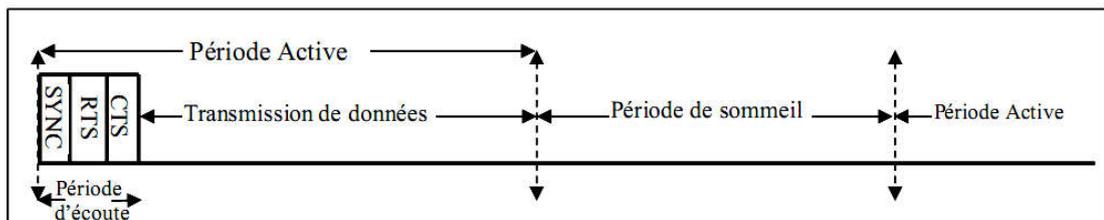


Figure 7 : le cycle « écoute/veille » périodique du S-MAC [16].

2. **T-MAC** [16] (**Timeout-MAC**) propose de mettre un nœud en mode sommeil après un temps TA durant lequel le nœud n'a reçu aucun message. Ainsi, T-MAC réduit l'*idle listening* par rapport à S-MAC.

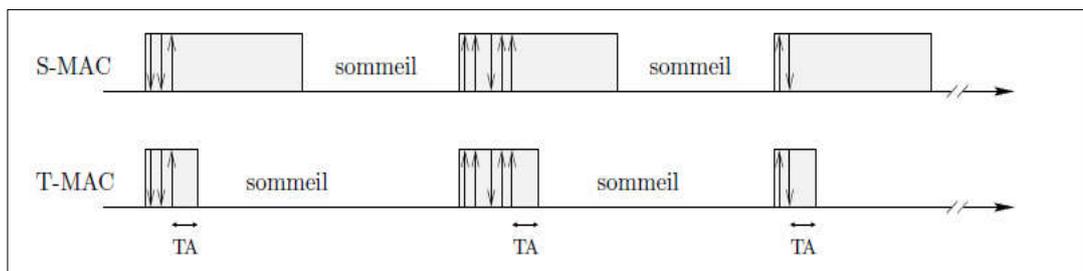


Figure 8 : Séquencèrent des périodes d'écoute et de sommeil de T-MAC et de S-MAC [16]

Avec cette approche, T-MAC fait dormir un nœud sans s'être assuré que ses voisins n'ont plus de données à lui envoyer. En effet, les données à envoyer du voisin ont pu être retardées à cause d'un échec d'accès au canal. Ce problème est appelé le sommeil prématuré.

T-MAC propose d'envoyer un FRTS (Future Request To Send) après la réception d'un CTS. Ce FRTS informe la destination qu'elle ne doit pas dormir après TA. Pour éviter une collision entre les données et le FRTS, le nœud qui devait envoyer après le CTS reporte sa transmission pour la durée d'envoi d'un FRTS. (pour plus de détail sur ces mécanismes se référer à [16]).

T-MAC réduit la consommation énergétique jusqu'à 96% sous faible charge par rapport à CSMA/CA de 802.11, et que T-MAC consomme autant que S-MAC sous forte charge. En revanche, T-MAC génère plus de trafic de contrôle que S-MAC [16].

Dans S-MAC et T-MAC, les nœuds choisissent leur période de réveil soit aléatoirement, soit de manière à ce qu'elle coïncide avec celle d'un voisin. Cela induit des retards sur le délai de bout-en-bout.

- ii. **Asynchrone** [14]: 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 (Low Power Listening).

3.6. Les Protocoles asynchrone (B-MAC, Wise-MAC, X-MAC, RI-MAC...)

1. B-MAC (Berkeley MAC) [10]

B-MAC est basé principalement 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 (voir Figure 7).

Les nœuds sont en mode sommeil la plupart du temps et se réveillent à intervalles réguliers. À leur réveil, ils écoutent le bruit sur le canal radio. S'il n'y a pas de bruit sur celui-ci, le nœud retourne en mode sommeil. S'il y a du bruit, cela signifie que des données vont arriver (à cause du préambule). Le préambule doit être suffisamment long (au moins égal à la période de sommeil), pour que tous les nœuds (et donc les destinataires des

données) puissent l'entendre. Ensuite, quand les données commencent à arriver, les nœuds qui ne sont pas destinataires de ces données retournent en mode sommeil.

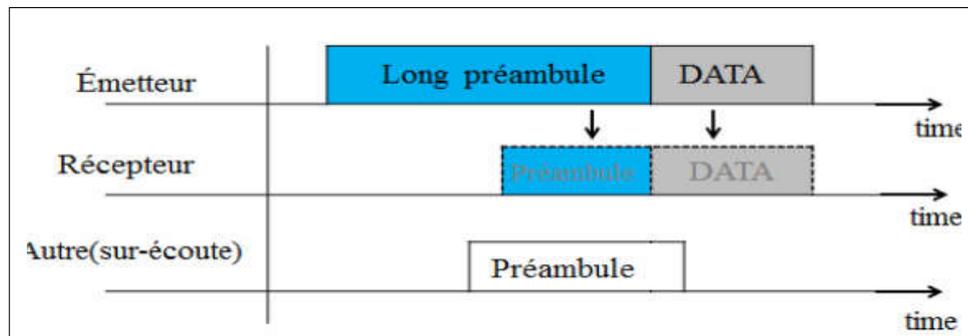


Figure 9 : Protocole B-MAC [10]

2. Le protocole Wise-MAC [17]

Wise-MAC utilise la technique de « Preamble Sampling » pour minimiser la perte d'énergie due au mode « idle listening ».

La technique de « Preamble Sampling » consiste à écouter le canal périodiquement pendant des périodes assez courtes pour vérifier s'il y a une activité sur le canal.

Si le canal est occupé, le récepteur continue son écoute jusqu'à ce qu'un paquet lui parvienne ou jusqu'à ce que le canal retourne à son état libre.

Au niveau de l'émetteur, un préambule « Wake-up » est transmis avant chaque message pour s'assurer que le récepteur sera à un état « actif » lorsque le message va lui arriver.

Ce préambule « Wake-up » va consommer de l'énergie (Overhead) que ce soit au niveau de l'émetteur ou du récepteur alors que le transfert de données n'a pas encore commencé.

Wise-MAC offre dans ce cas une méthode qui permet de déterminer dynamiquement la longueur de ce préambule de telle sorte qu'il soit le plus petit possible. Cette méthode consiste à connaître les schedules « sleep » des voisins directs de l'émetteur.

En connaissant ainsi le schedule « sleep » du destinataire, l'émetteur va émettre son préambule « Wake-up » pendant une période minimum T_p juste avant que le récepteur débute sa nouvelle période d'écoute.

La Figure 8 suivante montre et explique le fonctionnement de base du protocole Wise-MAC :

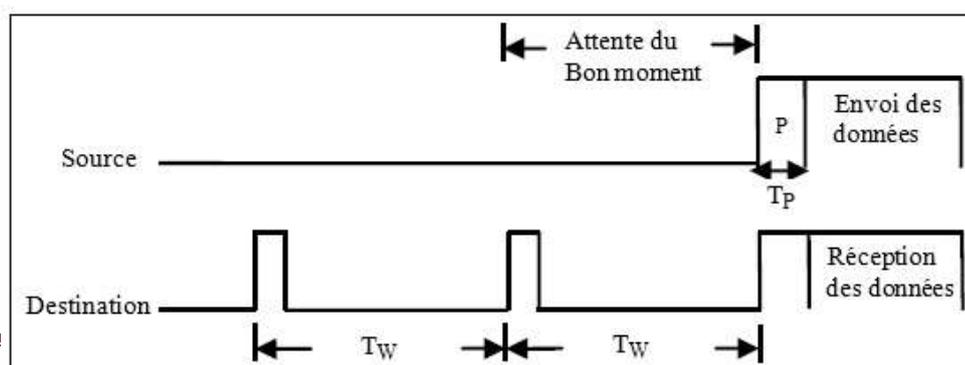


Figure 10 : Le protocole Wise-MAC

Chaque nœud maintient une table contenant les schedules « sleep » des voisins directes, qui sera lu et mis à jour par le nœud lui-même et ceci grâce au paquet ACK qui lui est renvoyé et qui non seulement acquitte son envoi mais aussi contient la durée restante au récepteur pour débiter son prochain écoute.

3. Le protocole X-MAC [18] est une amélioration de B-MAC pour résoudre le problème de sur-écoute. Au lieu de transmettre un long préambule, X-MAC le divise en un ensemble de petits paquets de préambule, chacun contenant l'adresse du destinataire du paquet à transmettre, 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 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 le destinataire. Comme B-MAC, X-MAC propose aussi l'auto-adaptation de la durée de sommeil en fonction de la variation du trafic. Par rapport à B-MAC, X-MAC permet d'améliorer l'efficacité énergétique et réduire le délai grâce au préambule raccourci. Néanmoins comme expliqué précédemment, X-MAC ne peut choisir qu'un seul routeur pour faire avancer le paquet vers sa destination dans un réseau multi-saut, même s'il existe de chemins multiples dont l'exploitation aurait pu rendre la transmission de bout en bout plus robuste [14]. Le problème du faible débit lorsque la charge est élevée reste toujours non résolu car c'est toujours CSMA/CA qui est utilisé.

4. Le protocole Receiver-Initiated MAC (RI-MAC) [19]

Un nœud utilisant un tel protocole va transmettre une balise à intervalle régulier pour indiquer qu'il est éveillé. Il écoutera donc le médium radio un court instant avant s'endormir à nouveau s'il ne réceptionne aucune donnée. Ainsi, un nœud souhaitant émettre une trame va simplement allumer sa radio et attendre la réception de la balise correspondant au destinataire du paquet avant de transmettre la trame de données.

Ces protocoles peuvent être relativement économes en énergie surtout si la transmission d'informations sur le médium radio est très consommatrice en énergie

4. Propriétés souhaitées d'un protocole MAC bien défini

Un bon protocole MAC doit optimiser les cinq critères suivants :

- La sur-écoute (overhearing) est le temps d'écoute du canal des nœuds voisins pendant le préambule, même si tout le monde n'est pas forcément le récepteur. Il est clair que la sur-écoute consomme inutilement l'énergie et donc à minimiser.

- L'écoute passive est une autre source du gaspillage de l'énergie que l'on doit minimiser. Elle a lieu quand un nœud doit maintenir sa radio active, même s'il n'a rien à transmettre.
- La collision conduit à des transmissions inutiles et la nécessité de retransmissions. Elle est donc à éviter ou minimiser.
- Le surcoût protocolaire (e.g. utilisation de RTS/CTS et autres paquets de contrôle supplémentaires, ajout des informations dans l'entête) doit être minimisé car il diminue le débit utile et augmente la consommation de l'énergie.
- Enfin, le taux d'utilisation du canal est un critère à maximiser. Quand CSMA est utilisé (ce qui est le cas de la plupart des protocoles MAC), la période aléatoire de backoff réduit le taux d'utilisation et augmente la consommation de l'énergie.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la couche MAC, couche de niveau 2 du modèle OSI et leurs protocoles. Ces protocoles sont directement responsables de la gestion de la radio et décident donc du moment où elle doit se mettre en veille, transmettre ou écouter le médium. On a aussi illustré quelque propriété et classification de ces protocoles.

Chapitre III

La description du protocole RI-MAC (Receiver-Initiated- MAC)

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons le mécanisme de fonctionnement du protocole RI-MAC dans les réseaux de capteurs sans fil, dans ce protocole la communication est initiée par le récepteur. Ce dernier réduit le temps d'écoute du récepteur et l'émetteur par l'utilisation du paquet de contrôle de balisage appelé « Beacon » afin de trouver un temps nécessaire « rendez-vous » pour échanger les données.

Les études actuelles signalent que ce type de protocole asynchrone rapporte une performance plus élevée, une meilleure fiabilité, et une efficacité énergétique par rapport aux autres protocoles asynchrones qui utilisent l'envoi des préambules tel que le protocole B-MAC et X-MAC. Ce chapitre décrit le fonctionnement du protocole RI-MAC, la structure du paquet de contrôle Beacon utilisé, pour établir la communication dans le réseau entre les nœuds de capteur ainsi que la méthode utilisée pour éviter la collision dans le réseau.

1. Le Protocol RI-MAC [19]

Dans RI-MAC, chaque nœud se réveille périodiquement en fonction de son propre calendrier pour vérifier s'il y a des trames de données entrantes destinées à lui. Après avoir allumé son radio, ce dernier diffuse immédiatement un beacon si le canal est libre, annonçant qu'il est éveillé et prêt à recevoir une trame de données. Un nœud S en possession des données à envoyer (voir la figure 11), reste actif en silence en attendant l'arrivée du beacon du récepteur destiné R. Lors de la réception du beacon de R, le nœud S commence la transmission du paquet de données immédiatement, qui sera accusé par l'envoi d'une autre beacon par le nœud récepteur R. Notez que ce deuxième beacon envoyé à un double rôle: premièrement, il reconnaît la réception correcte de la trame de données envoyée, et deuxièmement, il invite une nouvelle transmission de trames de données au même récepteur.

S'il n'y a pas de données entrant après la diffusion d'un beacon, le nœud va redormir, comme S fait plus tard dans la figure 11.

2. Intérêt de protocole RI-MAC

RI-mac réduit de manière significative la latence entre une paire de nœuds occupant le médium avant qu'ils atteignent un temps nécessaire « rendez-vous » pour l'échange des données, comparé à la transmission de préambule dans B-mac et X-mac. Ce temps court d'occupation permet plusieurs nœuds de contester pour échanger des données avec leurs récepteurs prévus, ce qui contribue à l'augmentation des capacités potentielles du débit dans le réseau. Plus important encore, cette augmentation est adaptative, en utilisant un beacon qui

Chapitre III : La description du protocole RI-MAC (Receiver-Initiated-MAC)

servir à la fois comme un accusé de réception du paquet de données reçu précédemment et comme une demande d'une nouvelle transmission de données.

Dans RI-MAC, le contrôle d'accès au médium entre les expéditeurs qui veulent transmettre des trames de données vers un même récepteur est principalement contrôlé par le récepteur. Ce choix de conception rend RI-MAC plus efficace dans la détection de collisions et de récupération des trames de données perdues que B-MAC et X-MAC lorsque les expéditeurs sont cachés les uns aux autres, ce qui peut être commun dans les réseaux ad hoc de capteurs. Après la transmission d'une beacon, un récepteur détecte les collisions dans la durée de fenêtre de Backoff spécifiée dans la beacon, ce qui est beaucoup plus court que le délai d'un intervalle de sommeil nécessaire dans B-MAC et X-MAC.

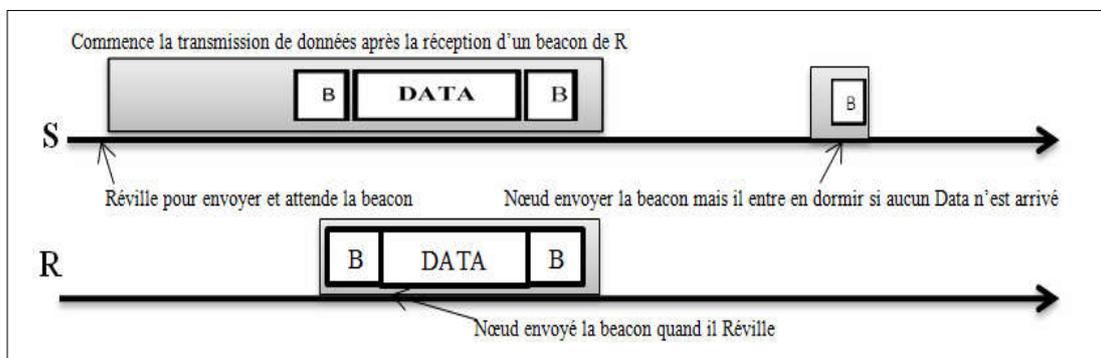


Figure 11 : le protocole RI-MAC [19]

3. La structure du paquet de contrôle Beacon :

La structure du paquet de contrôle beacon dans le protocole RI-MAC contient toujours un champ identifié par le **Src** : qui représente l'adresse du nœud source transmetteur de ce beacon.

- Un paquet beacon avec seulement un champ **Src** est appelé un paquet beacon de base.
- Selon le rôle du paquet beacon, ce dernier peut également inclure deux champs facultatifs : Un champ **Dst** indiquant l'adresse de destination, et un champ **BW** représentant la taille de fenêtre de backoff utilisée par les nœuds communiqués.
- Dans le paquet beacon on peut trouver d'autres champs tel que :
 - ✓ **Frame length** : représente la longueur du frame de données.
 - ✓ **Un champ de FCF** (Frame Control Field) : un champ utilisé pour contrôler le remplissage de tous les champs du paquet beacon.
 - ✓ **Un champ de FCS** (Frame Check Sequence) : représente le mécanisme de détection d'erreurs identique à celui de la norme IEEE 802.15.4 [25].

Chapitre III : La description du protocole RI-MAC (Receiver-Initiated-MAC)

Le format du paquet beacon de RI-MAC pour une radio d'IEEE 802, 15,4 est illustré sur la Figure 11 :

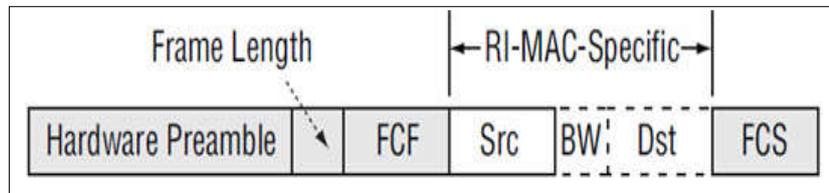


Figure 12 : la forme du paquet beacon dans RI-mac [19]

Après que le nœud récepteur *R* se réveille et détecte que le canal est libre, il transmet une beacon de base. Si le canal est occupé, le nœud *R* fait un Backoff et attend pour transmettre la beacon plus tard. Après la réception de la première trame de données du nœud émetteur *S*, le nœud *R* transmet une beacon dont l'adresse du nœud source et insère dans le champ *Dst* pour indiquer que cette beacon sert également à l'accusé de réception du paquet de données reçu du nœud *S*. Semblable à l'ACK de la transmission dans IEEE 802.11. La transmission de cette beacon de reconnaissance démarre après un délai SIFS.

Autre nœuds apart *S* ignorez le champ de *Dst* dans la beacon et traitez-le comme demande pour le déclenchement d'une nouvelle transmission de données.

Le Duty-cycle dans RI-MAC est contrôlé par un paramètre appelé l'intervalle de sommeil, qui détermine combien de fois un nœud se réveille et génère une beacon pour interroger d'autres nœuds voisins et attendre la trame de données. Si l'intervalle de sommeil égale L est utilisé dans certains WSN, après qu'un nœud génère un beacon, l'intervalle avant la prochaine génération de beacon est réglé sur une valeur aléatoire entre $0,5 \times L$ et $1,5 \times L$. De cette façon, ils ont essayé de réduire au minimum la possibilité que les transmissions de beacon de deux nœuds deviennent par hasard synchronisés.

4. Le double rôle d'une beacon dans RI-mac

Le rôle de beacon est double après la réception du trame de données: premièrement, il reconnaitre la bonne réception des donnés, et deuxièmes, il invite une nouvelle transmission de donnée au même récepteur.

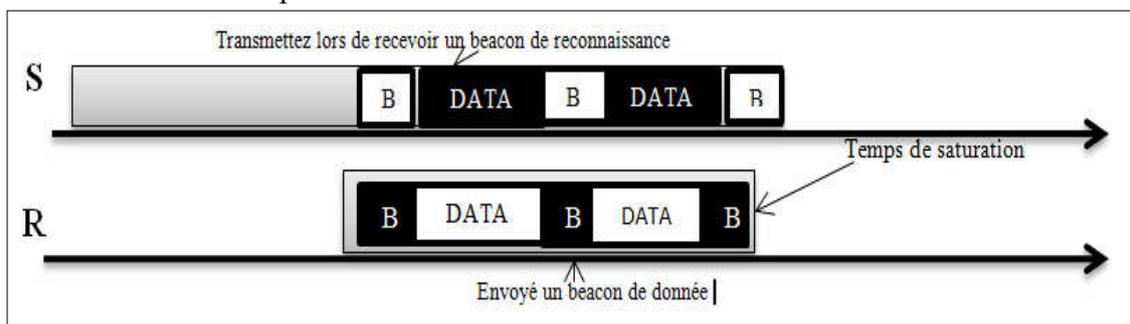


Figure 13 : Le double rôle d'une beacon dans RI-mac. [19]

5. Les pannes de RI-MAC

5.1. Détection de collision et la retransmission

RI-MAC réduit considérablement le coût pour détecter les collisions et la récupération des trames de données perdues par rapport à B-MAC et X-MAC. Un expéditeur peut transmettre la trame de données uniquement à la réception d'une beacon, et depuis la taille de la fenêtre de backoff explicitement contrôlé par le récepteur prévu, le récepteur connaît le délai maximum avant l'arrivée d'une trame de données. Ce délai peut être calculé à partir de la valeur BW dans la beacon précédente. Le récepteur doit seulement détecter le début du délimiteur Frame (DDF) pour apprendre d'une trame entrante. Si aucun DDF n'est détecté dans le temps, alors l'activité sur le canal, est détecté, vérifier par le CCA (évaluation si le canal est libre), le récepteur va décider qu'il y avait une collision et va générer une autre beacon avec une valeur BW plus grande. Dans RI-MAC, cette nouvelle beacon est transmis après la plus longue transmission de données possibles est terminée afin que les radios de tous les expéditeurs sont déjà en mode de réception.

Avant de transmettre une beacon, un nœud fait un backoff aléatoire pour éviter les collisions possibles répétées avec des beacon envoyés par un autre nœud.

Après avoir détecté une collision, un récepteur calcul la nouvelle valeur de BW qui sera utilisée dans la prochaine beacon, en utilisant certain stratégies de backoff telle que le binary exponential backoff (BEB) dans IEEE 802,11 et d'autres [34.35], selon la densité d'un réseau.

Dans RI-mac, un récepteur joue le rôle principal dans le control de la retransmission en contrôlant la synchronisation et le nombre de transmissions de beacon. Si la valeur de BW a atteint la taille maximum de fenêtre de backoff, ou si le récepteur détecte des collisions après un certain nombre de transmissions consécutives de beacon, le récepteur va dormir sans d'autres essais. Les expéditeurs correspondant deviennent également compliqués dans la commande de la retransmission, parce qu'un expéditeur pourrait manquer de recevoir une beacon aussi à cause des collisions ou des états faibles de canal. Ainsi, un expéditeur maintient un compte de nouveau essai de chaque trame de donnée. Si aucune balise n'a été reçue du récepteur prévu dans un intervalle de temps 3 fois plus longue que l'intervalle de sommeil, l'expéditeur augmente le nombre de tentatives en cours par 1. En outre, l'expéditeur augmente ce compte de nouvel essai si aucune balise de reconnaissance n'est reçue dans le maximum de backoff windows après que l'expéditeur a transmis une trame de données suivant la réception d'une beacon. Quand le nombre de nouvelle tentative atteint une limite, l'expéditeur annulé la transmission des données.

6. Beacon-Sur-Demande (Beacon-on-Request) [19]

Il est possible que le nœud de réception destinée à une partie d'émetteurs soit déjà actif, lorsqu'un émetteur se réveille pour transmettre une trame de données vers ce récepteur. Une optimisation, appelée Beacon-Sur-Demande «Beacon-on-Request» est utilisée. Une fois que le nœud émetteur se réveille et après la vérification du canal (CCA) par ce dernier il envoie ce type de beacon comme illustré sur la figure 14. Dans ce beacon, l'expéditeur S définit le champ Dst l'adresse du destinataire, R. Si le récepteur R arrive à être actif, il génère une beacon en réponse après un certain délai aléatoire plus long que le BW a annoncé dans la beacon reçue de S. Cette beacon générée par le récepteur sur demande de l'expéditeur, permet à l'expéditeur de transmettre la trame de données en attente immédiatement, plutôt que d'attendre la prochaine émission de beacon prévue par R.

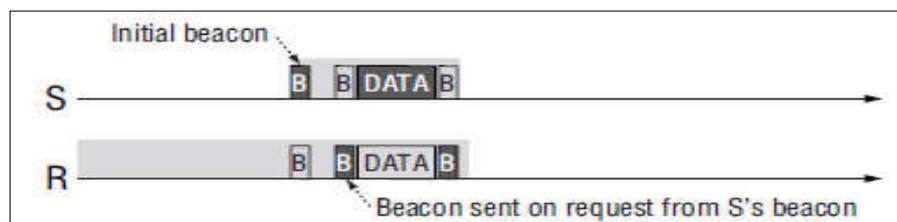


Figure 14 : Beacon-on-Request [19]

7. Transmissions de la trame de données par des expéditeurs opposés

Les défis de manipulation des transmissions d'un imprévisible par un nombre d'expéditeurs opposés sont :

- Minimisé le temps active d'un récepteur pour l'efficacité énergétique.
- réduisez au minimum le coût pour la détection de collision et le rétablissement des données perdues, si des expéditeurs sont cachés entre eux.

Pour rencontrer ces buts dans RI-mac, un récepteur utilise des trames de beacon pour coordonner des transmissions de trame de données avec les expéditeurs prévue. Le champ de BW dans une beacon indique la taille de la fenêtre backoff d'expéditeurs devrait être employé quand ils contestent le milieu. Si une beacon reçue ne contient pas un champ de BW (C'est une beacon de base), les expéditeurs pour ce récepteur devraient commencer à transmettre des données sans backing off. Si une beacon contient un champ de BW, chaque expéditeur fait un backoff aléatoire en utilisant le BW indiqué dans la beacon reçue. Le récepteur augmente la valeur du champ de BW lors de la détection des collisions. Avant la transmission de données, un expéditeur devrait s'assurer que le canal est libre pendant au moins le temps de T_p en utilisant des contrôles de CCA (clear channel assessment).

Les contrôles de CCA empêchent l'expéditeur pour commencer la transmission de données tandis que le récepteur prévu produit une beacon de reconnaissance à une trame de données qui reçue d'un autre expéditeur. Le temps T_p est placé à SIFS plus le délai de propagation est maximum, si un nœud a besoin plus de temps pour se produire et envoyer une acknowledgment beacon.

8. Organigramme du Protocol RI-MAC

L'organigramme de la figure 15, illustre le comportement de chaque nœud dans le réseau de capteurs sans fil par l'application du protocole RI-MAC.

Les abréviations	Signification
CCA	Clear channel Assesment (vérification si le canal est libre)
Time _{CCA}	Temps de vérification de CCA
T _{AACK}	Temps d'attente d'un accusé de réception de données
T _{Adonnée}	Temps d'attente de réception de paquet de données

Tableau 2: Liste des abréviations utilisées dans l'organigramme de la figure 15.

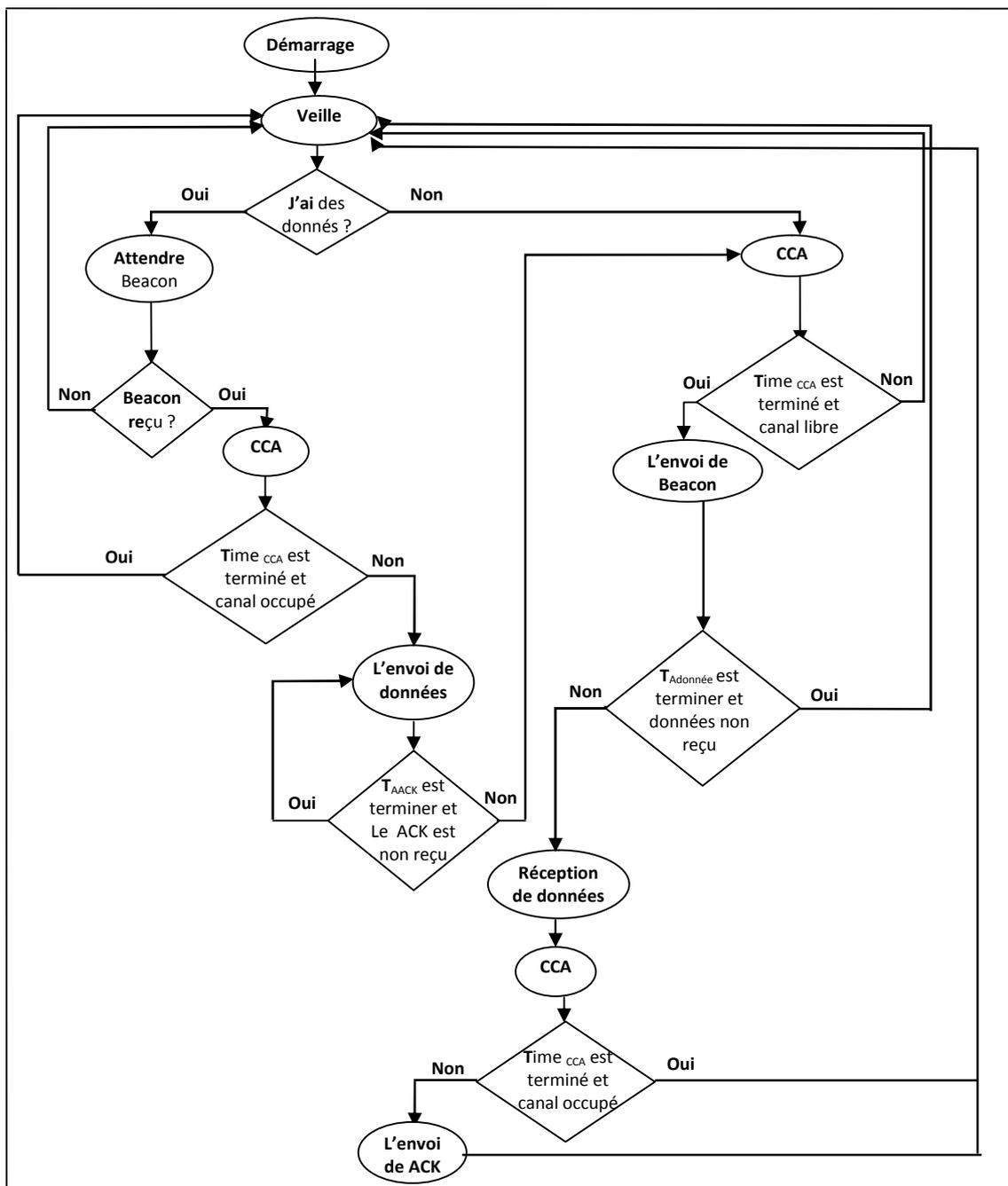


Figure 15 : Organigramme de RI-MAC (comportement au niveau d'un nœud)

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons décrit le mécanisme de fonctionnement du protocole RI-MAC pour les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), la trame de contrôle beacon utilisé où nous avons expliqué leur structure et leur rôle lors de la transmission du paquet de données à partir de l'émetteur vers le destinataire, et comment traiter le problème de collision.

Chapitre IV

Evaluation des Résultats de Simulation

Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie pratique de notre travail. Il décrit notre implémentation ainsi la description de notre simulateur réalisé.

L'objectif de notre travail est d'étudier et évaluer les performances du protocole RI-MAC par la réalisation de notre propre simulateur sous MATLAB.

1. L'environnement utilisé

Le MATLAB (version R2013b) : Cette Version est disponible pour les systèmes d'exploitation Linux (64bits), Mac OS X (64 bits) et Windows (32 et 64 bits).

2. Définition de Matlab [24]

MATLAB (« matrix laboratory ») est un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement du même nom; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Les utilisateurs de MATLAB (environ un million en 2004) sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. Matlab peut s'utiliser seul ou bien avec des toolbox (« boîte à outils »).

3. Les particularités de MATLAB

MATLAB permet le travail interactif soit en mode commande, soit en mode programmation. Tout en ayant toujours la possibilité de faire des visualisations graphiques. Considéré comme un des meilleurs langages de programmations (C ou Fortran), MATLAB possède les particularités suivantes par rapport à ces langages :

- la programmation facile.
- la continuité parmi les valeurs entières, réelles et complexes.
- la gamme étendue des nombres et leurs précisions.
- la bibliothèque mathématique très compréhensive.
- l'outil graphique qui inclut les fonctions d'interface graphique et les utilitaires.
- la possibilité de liaison avec les autres langages classiques de programmations (C ou Fortran).

4. L'implémentation

Dans ce point concernant l'implémentation, on va donner la description des paramètres utilisés par le protocole RI-MAC et une description sur notre travail et quel résultat obtenu

4.1. Les paramètres utilisés de simulation

Paramètres	Valeurs
Temps d'écoute	2s
Taille de paquet d'Ack	6 bits
Taille d'un paquet	1024 bits = 1kbit
Taille de Beacon	12 bits
Energie de transmission/réception électronique	50 nJ/bit.
Energie d'amplification	100 nJ/bit/m2.
Energie initiale	0.5 J

Tableau 3 : Les paramètres utilisés pour la simulation de protocole RI-MAC

4.2. Les métriques de performance

La performance du protocole de MAC étudié est évaluée selon les deux métriques suivantes :

- a) **L'énergie totale consommée** : Comme la capacité énergétique des nœuds capteurs doit être utilisée efficacement afin de maximiser la durée de vie du réseau, donc le protocole de 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 (émission/réception). L'énergie totale consommée est calculée en utilisant la formule suivante:

$$\text{L'énergie totale consommée} = \sum_{i=1}^N (e_{i,init} - e_{i,res})$$

Avec :

N : Le nombre de nœuds.

$e_{i,init}$: L'énergie initiale.

$e_{i,res}$: L'énergie résiduelle.

b) **La latence moyenne** : Ceci représente le délai moyen entre le début de la diffusion et la dernière réception du message de diffusion;

4.3. Fonctionnement du simulateur réalisé

Le fonctionnement de base de notre simulateur est tracé par le l'organigramme de la figure suivante :

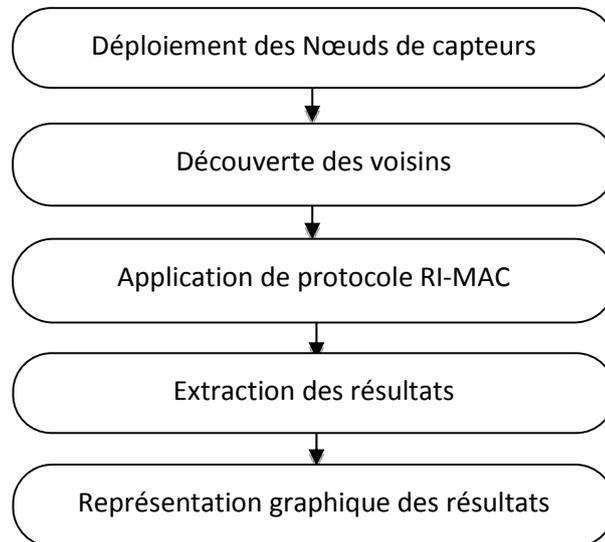


Figure 16 : Fonctionnement du simulateur réalisé

4.4. Bloc fonctionnel du simulateur

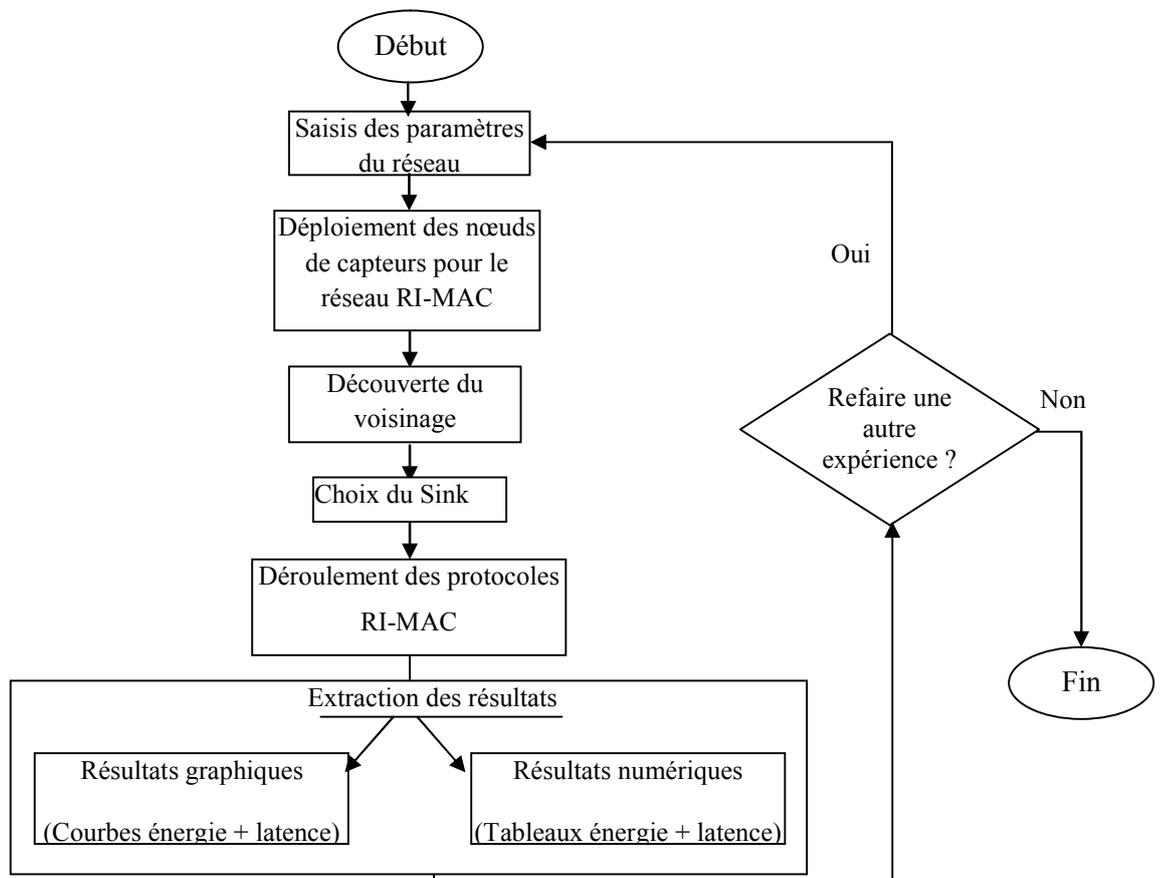


Figure 17 : Schéma du bloc fonctionnel du simulateur réalisé

4.5. La description du Simulateur et les résultats de simulation :

Nous présentons dans cette section la description de notre simulateur, on commençant par l'interface principale.

a) L'interface principale :

Une fois l'utilisateur lance le simulateur alors il obtient la fenêtre suivante :

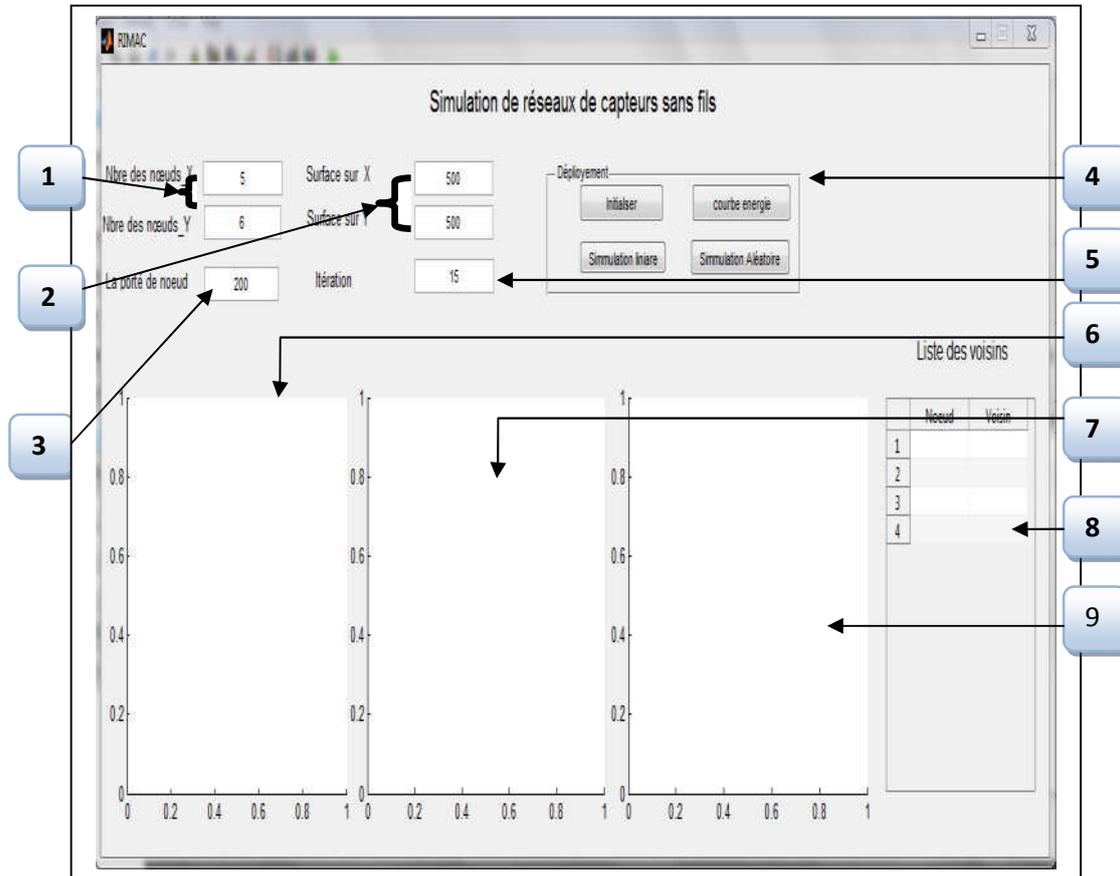


Figure 18 : L'interface principale de notre simulateur

- 1- Zone identifier le nombre des nœuds
- 2- Zone identifier la distribution des nœuds
- 3- Zone pour saisir la portée de nœud.
- 4- Zone contient des boutons de simulation de réseau.
- 5- Zone pour saisir le nombre des itérations de réseau.
- 6- Méthode de disposition des nœuds sous forme linéaire ou aléatoire
- 7- Zone pour afficher la courbe de l'énergie moyenne consommée par nombre d'itération.
- 8- Zone pour afficher les voisins des nœuds de capteurs
- 9- Zone pour afficher la courbe de l'énergie moyenne consommée par nombre des nœuds

b) Déploiement des nœuds de capteurs

Cette étape consiste à déployer les nœuds de capteurs sans fil dans un espace à deux dimensions d'une manière aléatoire ou se forme une grille. Un déploiement se forme une grille consiste à placer les nœuds sur des distances équitables afin de garder une présence homogène sur l'espace de déploiement. Tandis qu'un déploiement aléatoire ne respecte pas l'homogénéité de présence dans l'espace, il est basé sur une fonction aléatoire qui génère à chaque fois un positionnement différent par rapport au positionnement précédent.

Chaque nœud au démarrage possède les données suivantes :

- Une position en deux dimensions.
- Une portée radio de son transmetteur permettant la détection de ses voisins.
- Energie initiale de nœud.

✓ Le déploiement des nœuds de capteur se forme une grille

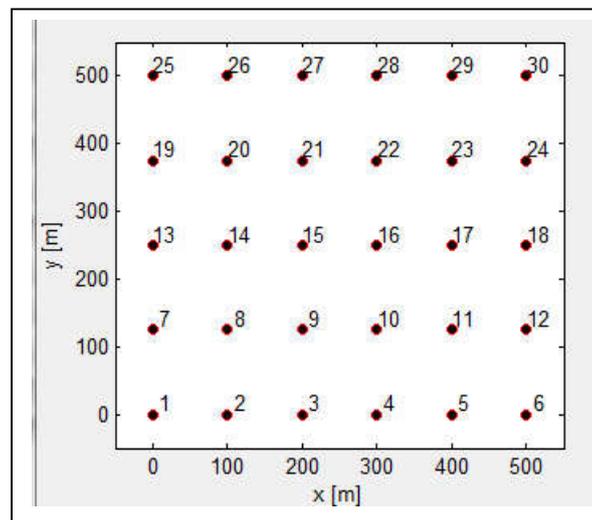


Figure 19: Le déploiement des nœuds de capteurs se forme une grille

✓ Le déploiement aléatoire des nœuds de capteur

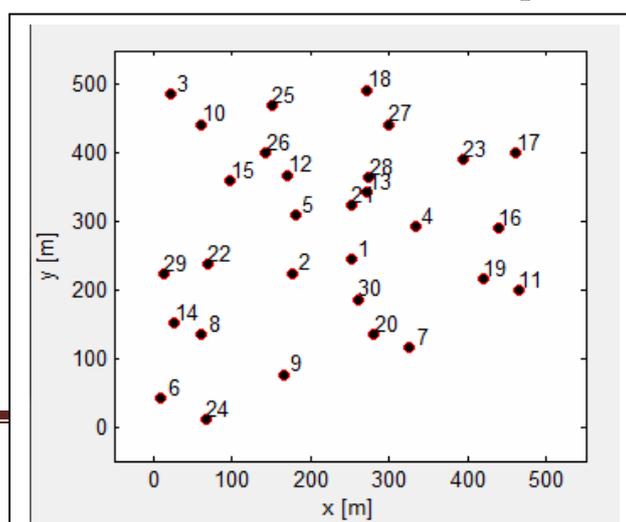
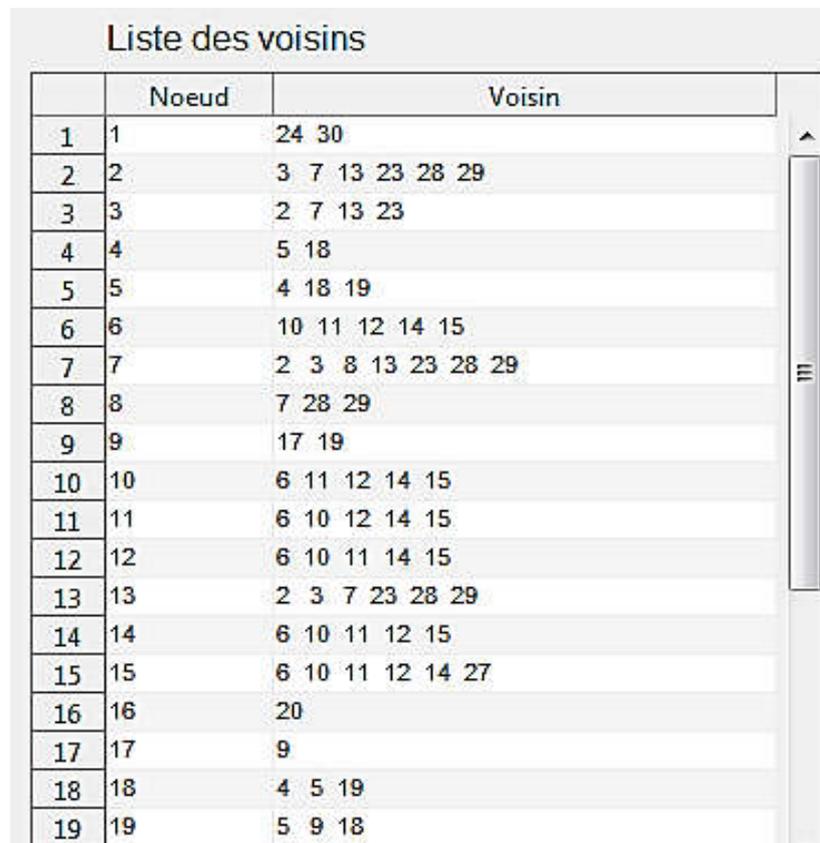


Figure 20 : Le déploiement aléatoire des nœuds de capteur

c) Découverte la liste des voisins

La découverte des nœuds voisins est basée principalement sur les performances du transmetteur. Si la distance entre deux nœuds est inférieure ou égale à la portée maximale de la radio du transmetteur, alors les deux ce sont des nœuds voisins.

Lorsqu'un nœud de destination s'active, il lance un mécanisme de découverte de voisinage, il diffuse un paquet vers tous les nœuds voisin jusqu'à ce qu'ils atteignent le nœud source afin de trouver tous les routes reliant la destination à la source. La figure qui suit présente le résultat de simulation lors de l'exécution de cette procédure de découverte des voisins.



	Noeud	Voisin
1	1	24 30
2	2	3 7 13 23 28 29
3	3	2 7 13 23
4	4	5 18
5	5	4 18 19
6	6	10 11 12 14 15
7	7	2 3 8 13 23 28 29
8	8	7 28 29
9	9	17 19
10	10	6 11 12 14 15
11	11	6 10 12 14 15
12	12	6 10 11 14 15
13	13	2 3 7 23 28 29
14	14	6 10 11 12 15
15	15	6 10 11 12 14 27
16	16	20
17	17	9
18	18	4 5 19
19	19	5 9 18

Figure 21 : La liste des nœuds voisins

d) Le déroulement du protocole RI-MAC :

Dans notre simulation et après le choix d'un nœud comme un Sink, nous avons déroulé le protocole RI-MAC afin d'analyser et d'évaluer ses performances (la

Chapitre IV: Evaluation des résultats de simulation

consommation d'énergie et la latence). Les résultats obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous :

- L'énergie totale consommée par le réseau :

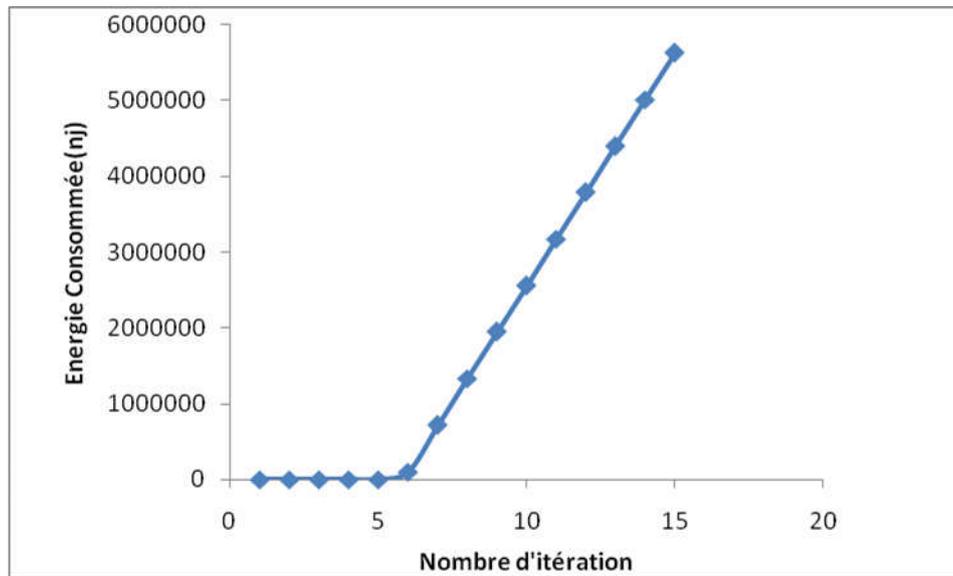


Figure 22 : L'énergie moyenne consommée par rapport au nombre d'itération

La figure 22 représente la courbe associée à notre évolution de simulation par l'application des différents nombre d'itérations en déroulant le protocole RI-MAC. Dans ce cas la consommation d'énergie est évalué en fonction de nombre d'itération, à la fin de simulation nous avons obtenu une valeur d'énergie de $5.5 * 10^6$ nj pour 15 itérations et $4 * 10^6$ nj pour 10 itérations d'où on a déduit l'influence de nombre d'itération sur l'énergie consommée lors de la simulation par le réseau. A partir de ces résultats on peut conclure que tant que le nombre d'itération est élevé tant que la quantité d'énergie consommée est importante.

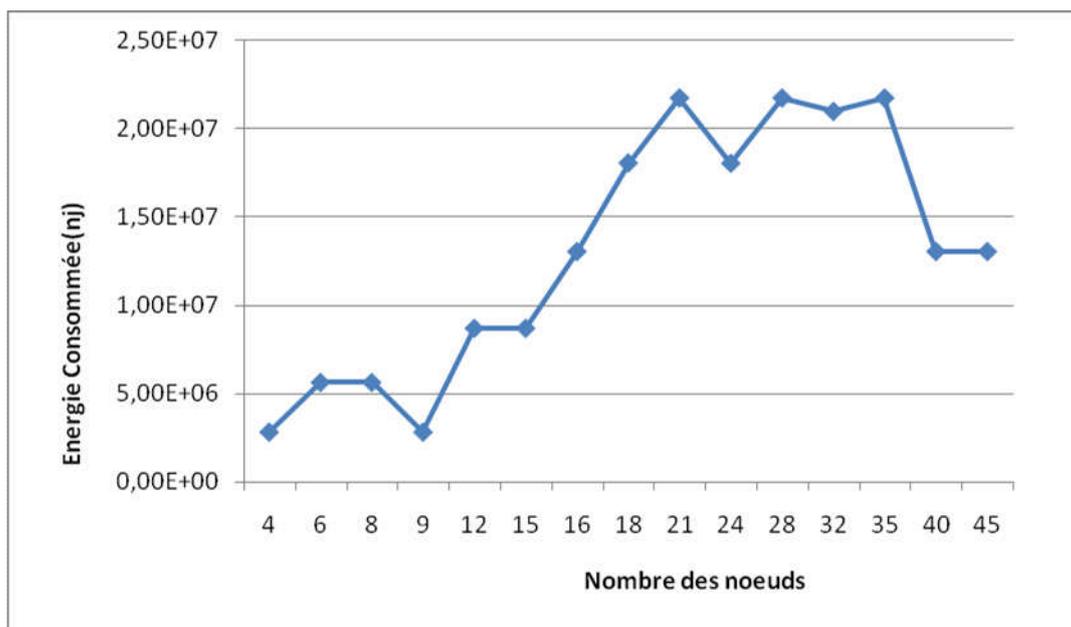


Figure 23 : L'énergie consommée par plusieurs simulations en variant le nombre de nœuds

Chapitre IV: Evaluation des résultats de simulation

La courbe illustré par la figure24 associée à notre simulation par l'utilisation des différents nombre d'essais en variant le nombre des nœuds dans le réseau (de 4 à 45), on remarque à partir de cette courbe une augmentation de la consommation d'énergie par le réseau qui dépend de la densité du réseau (nombre des nœuds utilisés) d'où nous avons déduit l'influence de la densité de réseau sur l'énergie consommée lors de la simulation sauf que à partir de 45 nœuds on remarque que la consommation d'énergie se stabilise.

- La latence :

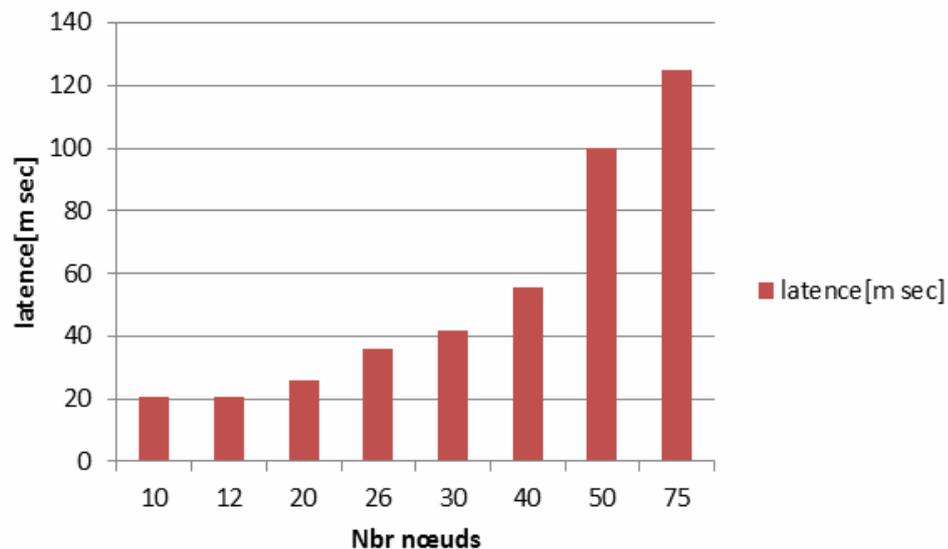


Figure 24 : la latence par nombre des nœuds

La figure 24 représente la courbe de la latence qui associée à la simulation par l'utilisation des différents nombre des nœuds avec différent nombres de simulation, la latence est évaluée dans ce scénario en fonction de nombre des nœuds, d'après les histogrammes de la figure 24 on remarque une augmentation de la valeur de latence d'où on déduit l'influence de la variation de nombre des nœuds sur la latence.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit notre implémentation ainsi que la description de notre simulateur : nous avons commencé par donner son objectif, ainsi que l'outil utilisé pour faire la simulation puis nous avons décrit le résultat obtenu par notre simulateur.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs constituent un axe de recherche très fertile et peuvent être appliqués dans plusieurs domaines différents. Cependant, il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans les conditions réelles. L'un des problèmes qu'on peut rencontrer dans ce genre de réseau est la problématique de l'économie d'énergie et l'amélioration de la durée de vie des réseaux de capteurs. Ce problème est causé par le fait que les réseaux de capteurs sont déployés dans des environnements inaccessibles et que leurs batteries à faible puissance ne peuvent pas être rechargées.

Nous avons suivi les étapes suivantes : Dans la première étape, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil : leurs conceptions, architectures de communication et leurs domaines d'applications. Nous avons exposé également la couche MAC dans la deuxième étape et les différents types de protocoles MAC utilisés synchrones et asynchrones par les RCSFs puis nous avons décrit le protocole RI-MAC. De ce fait, premièrement nous avons constaté que le problème d'énergie joue un rôle important pour prolonger la durée de vie du réseau. Deuxièmement, nous avons constaté que l'énergie diminuée au niveau de la communication représente la plus grande énergie consommée. Donc, dans la deuxième étape nous nous sommes focalisés au niveau de la communication : couche MAC (Medium Access Control).

Dans ce mémoire, nous avons évalué deux performances pour le protocole RI-MAC (Receiver-Initiated MAC) la consommation d'énergie et la latence, la tâche de ce protocole dans les réseaux de capteurs sans fil permettre aux noeuds capteurs d'échanger les données entre eux sur la base de la méthode de duty cycling.

Le protocole RI-MAC (Receiver-Initiated MAC) réalise un rendement élevé de latence et il minimise la consommation d'énergie en évitant les principales causes de consommation d'énergie: les collisions, l'écoute à un canal libre, l'overhearing, l'overhead et les fréquentes transitions entre les modes "en veille" et "activité".

En fin nous pouvons dire que notre travail est extensible. De ce fait, plusieurs améliorations et perspectives futures restent à étudier. Entre elles, nous pouvons citer :

- ❑ Comparer le protocole RI-MAC avec d'autres protocoles MAC
- ❑ Simuler le protocole RI-MAC par l'utilisation des autres simulateurs tel que OMNET++, NS2....

La Bibliographie

- [1] **Ouared K**, *La simulation du protocole SMAC dans les réseaux de capteurs sans fil*, 2014-2015,p1.
- [2] **Dhib A**, *Routage avec QOS temps réel dans les réseaux de capteurs*, 2006-2007..
- [3] **Akyildiz I.F** ,**Su w. Sankarasubramaniam** , **Cayirci E.** , *A Survey on Sensor Networks"*, *IEEE Communications Magazine* 102-114., (2002), pp. 102-114.
- [4] **Qinghua W** et **Ilangko B**, *Wireless Sensor Networks – An Introduction"* *Wireless Sensor Networks Application-Centric Design*, *Geoff V Merrett and*, 2010, pp. 978-953-307-321-7.
- [5] **CASAS C**, **Juan P**, **NGUYEN V**, **VU N**, **Thanh H**, *Application de vidéo surveillance avec un réseau de capteurs multimédia sans fils*, 2011,
- [6] **Castelluccia C** et **Francillon A**, *Protéger les réseaux de capteurs sans fil*, 2008.
- [7] **Sentilles S**, *Architecture logicielle pour capteurs sans fils en réseau*, 2006.
- [8] **Milenkovic A** et al. *AI*, *Wireless sensor networks for personal health monitoring*, 2006.
- [9] **Yassine Y**, «Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs,» 2012, pp. 15-18.
- [10] **Benchohra N**, «La simulation du protocole SMAC dans les réseaux de capteurs sans fils,» 2011, p. Pages10.
- [11] **Heinzelman W**, **Chandrakasan A**, **Balakrishnan H**, *Energy-Efficient communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks*, 2000, pp. 80,20.
- [12] **Damien R**, *Gestion de la mobilité dans les réseaux de capteurs sans*, 2013, p. 16.
- [13] «cisco.goffinet.org.html,» 24 3 2016. [En ligne].
- [14] **Ye w**, **Heidemann j**, et **Estrin D**,, *An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 21st Annual Joint*, 2002, p. 1567–1576.
- [15] **Rajendran V**, **Obraczka K**, et **Garcia-Luna-Aceves J**, *Energy-Efficient collision-free medium access control for wireless sensor networks*, 2016, p. 63–78.
- [16] **Ye W**, **Heidemann J**, et **Estrin D**, *An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks*, 2002, p. 1567–1576.
- [17] **Decotignie**, **El-Hoiydi A** et **Dominique J**, *WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for Multi-hop Wireless Sensor Networks*, 2004, p. 18–31.

- [18] **Buettner M, Yee G, Anderson E, et Han R**, *X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks*, 2006, pp. 307-320.
- [19] **Yanjun S, Omer G, David B et Johnson**, *RI-MAC: A Receiver-Initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks*, 2008, p. 53–62.
- [20] Alex K, Roedig School of Computing and Communications Lancaster University, United Kingdom”
Poster: RI-MAC Enhancements for Interference Resilience
- [21] **Andrzej K, Arunchandar V, Udaya S, et Ashok A**, *Sniffing Out the Correct Physical Layer Capture Model in 802.11b.*, 2004, p. 252–261.
- [22] **Jeongkeun L, Wonho K, Sung-Ju L, Daehyung J, Jiho R, Taekyoung K, et Yanghee C**, *An Experimental Study on the Capture Effect in 802.11a Networks. In Proceedings of the the Second ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization (WiNTECH, 2007, p. 19–26.*
- [23] **Toumi M et AMZIANE A**, *Plateforme d'évaluation de la tolérance aux pannes des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil*, p. 2011.
- [24] **Belarbi F**, *Amélioration de la durée de vie d'un Réseau de capteurs sans fil à l'aide d'un algorithme génétique*, p36. 2015.
- [25] **Heinzelman.B, Chandrakasan.A et Balakrishnan.H.**, *"An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks"*, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4), pp. 660–667, October 2002.

Webographie

- [14] cisco.goffinet.org.html. [En ligne] 24 3 2016.