

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

UNIVERSITE DE IBN KHALDOUN TIARET

FACULTE DE MATHEMATIQUE ET INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir le diplôme de

Master en Génie Informatique

Spécialité : Systèmes Embarqués



Thème

La simulation du protocole SMAC dans les réseaux de capteurs sans fil



Encadré par :

- **Mr. BENGHENI Abdelmalek**



Présenté par :

- **BENCHOHRA Nadia**

Année Universitaire : 2014-2015

Remerciements

Au terme de ce travail je tiens tout d'abord à remercier Allah le tout puissant de m'avoir donné la foi, la volonté et la persévérance pour l'aboutissement de ce travail.

Je présente mes sincères remerciements à mon encadreur

Mr. BENGHENI Abdelmalek qui me soutenir et encadré durant toutes les étapes de ce projet de fin d'étude, je le remercie infiniment pour sa disponibilité, sa patience, sa rigueur scientifique, et ses remarques et conseils pertinents.

Nous tenons à remercier également les membres du Jury pour leur précieux temps accordé à l'étude de ce mémoire

Nos remerciements et gratitude vont aux professeurs et enseignants, étudiants et personnel de notre l'université qui forment une famille très unie

Nos remerciements vont enfin s'adresser à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail



Dédicaces

Grace à Allah j'ai pu réaliser cet humble travail que je dédie à :

Mes très chers parents pour leurs soutien, amour et sacrifices pendant toutes mes années d'études, que dieu vous bénisse, vous procure la bonne santé et vous gardes pour moi.

Mon cher frère Mohamed et mes sœurs que dieu soit toujours avec vous.

Mes proches amis : Zohra et Nouredine et Nedjla et Linda et pour leurs soutiens et conseils.

Ma collègue et amie Fatiha pour tous les moments agréables qu'on a passés ensemble durant cette année et à toute sa famille.

Tous mes amies : Khalidia, Ibtissem, Khadidja, Mamy je vous souhaite toute la réussite dans la vie.

Tous ceux qui sont proches de mon cœur et dont je n'ai pas cité le nom.



Nadia

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 perçues par un capteur sont acheminées de voisin en voisin jusqu'à atteindre une station de base ou puits.

Les réseaux de capteurs sans fil suscitent un grand intérêt vu les nombreux avantages qu'ils apportent mais souffrent, néanmoins, de limitations en terme de consommation énergétique. De plus, il est difficile voire même impossible de remplacer les batteries des capteurs.

Dans les RCSFs la conservation d'énergie est un problème important. Plusieurs travaux se concentrent à la conservation d'énergie dans la communication en concevant des protocoles de contrôle d'accès au médium (MAC) spécialement pour ces réseaux. Le principe utilisé dans la plupart de ces travaux est de permettre aux nœuds capteurs de se mettre en veille au lieu de rester en mode d'écoute au canal, ce dernier consommant beaucoup d'énergie. Mais, ils n'évitent pas les fréquentes transitions entre les modes "en veille" et "activité" (réception ou transmission) alors qu'elles consomment aussi de l'énergie. L'objectif de ce travail est de simuler le protocole SMAC choisis par l'utilisation de la plateforme de simulation des RCSFs « Castalia » et le simulateur OMNeT++.

Mots-clé : réseau de capteurs sans fil (RCSF), MAC (Medium Access Control), Castalia, OMNET, la consommation d'énergie.

Abstract

It has become necessary, in recent years, to observe, monitor and control certain physical phenomena. This was made possible by 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 until a neighbor base station or wells.

Wireless sensor networks are of great interest given the many benefits they bring but suffer, however, limitations in terms of energy consumption. Moreover, it is difficult or impossible to replace the batteries of the sensors.

In WSNs energy conservation is an important issue. Several works focuses on energy conservation in the communication by designing medium access control protocol (MAC) specifically for these networks. The principle used in most of this work is to enable sensor nodes go to sleep instead of staying in the listening mode to the channel, it consumes a lot of energy. But, they do not avoid frequent transitions between "Standby" and "activity" (reception or transmission) while they also consume energy. The objective of this work is to show the effectiveness of our chosen SMAC protocol and simulate it by using the simulation platform of WSNs "Castalia" and OMNeT ++ simulator.

Keyword Tags: wireless sensor network (WSN), MAC (Medium Access Control), Castalia, OMNET, energy consumption.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
❖ <u>Chapitre 1</u> : Les réseaux de capteurs sans fil : Concepts et domaines d'application	
Introduction.....	3
I. Les réseaux Ad hoc	3
1. Les topologies de réseaux sans fil.....	3
2. Le modèle des environnements mobiles.....	4
3. Les réseaux mobiles Ad hoc.....	5
4. Définition.....	5
5. Applications.....	5
6. Modélisation.....	6
7. Caractéristiques des réseaux Ad hoc.....	6
II. Les réseaux de capteur sans fil.....	7
1. Introduction aux réseaux de capteur sans fil.....	7
2. Définitions d'un réseau de capteurs sans fil.....	7
3. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil.....	8
4. Configuration matériel d'un nœud de capteur.....	9
5. Description du transceiver.....	10
6. Comparaison d'un réseau RCSF avec les réseaux ad hoc.....	10
7. La pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil.....	11
7.1. Le rôle de chaque couche	12
8. Quelques applications de RCSF.....	12
9. Accès medium dans les réseaux de capteur sans fil.....	13
10. MAC à efficacité d'énergie.....	13
11. Modèle de calcul d'énergie.....	14

11.1.	Modèles de communication dans les RCSF.....	15
12.	Fonctionnement de la couche MAC en mode économie d'énergie.....	16
III.	La couche MAC	16
1.	Les services MAC.....	16
2.	La trame MAC.....	16
2.1.	Format des trames de contrôle	16
2.2.	Format des trames de données	17
3.	Rappel sur le CSMA/CD d'Ethernet.....	18
3.1.	Généralités	18
3.2.	Problème du CSMA dans le cas des réseaux sans fil	18
	Conclusion	19
	❖ <u>Chapitre 2</u> : La description du protocole SMAC (Sensor MAC)	
	Introduction.....	20
I.	Protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil	20
1.	Propriétés souhaitées d'un protocole MAC bien défini.....	20
2.	Classification des protocoles MAC.....	21
II.	Protocole de RCSF.....	23
1.	Sensor-MAC (S-MAC).....	23
2.	Autres protocoles MAC.....	26
	Conclusion	28
	❖ <u>Chapitre 3</u> : Simulation de protocole SMAC pour les RCSFs	
	Introduction.....	29
I.	Présentation d'OMNeT++.....	30
1.	Description architectural d'OMNeT++.....	30
2.	Principaux fichiers d'OMNeT++.....	32
II.	L'application Castalia.....	33
III.	Mise en œuvre de l'environnement de travail.....	34
1.	Mise en place de l'environnement de travail.....	35

1.1. La couche MAC	35
2. Réalisation.....	36
2.1. Objectif	36
3. Description détaillé.....	36
4. Résultats et analyses de simulation de protocole S-MAC.....	38
Conclusion	44
Conclusion Générale	44
Bibliographie.....	45
Webographie.....	46

Liste des figures

Figure 1 : Le changement de la topologie des réseaux ad hoc [1]	4
Figure 2 : Les échanges dans les modes Infrastructure et sans Infrastructure (Ad-hoc).....	4
Figure 3 : La modélisation d'un réseau ad hoc	6
Figure 4 : Réseau de capteurs sans fil [3].....	8
Figure 5 : Architecture simplifiée d'un réseau de capteurs sans fil [8].....	9
Figure 6 : Exemple d'un capteur	9
Figure 7: Composition d'un capteur [8]	10
Figure 8 : Modèle en couches du réseau de capteurs sans fil [11]	11
Figure 9 : Les différentes applications des RCSF	13
Figure 10 : Modèle de consommation d'énergie.....	15
Figure 11 : Format de Trames de contrôle	17
Figure 12 : Format général d'une trame de données.....	18
Figure 13 : Réseaux sans fil distribués et centralisés	21
Figure 14 : Classification des protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil.....	22
Figure 15: le cycle « écoute/veille » périodique du S-MAC[21].	24
Figure 16 : Déroulement des opérations dans le protocole SMAC.....	24
Figure 17 : Périodes d'écoute et de veille dans T-MAC	27
Figure 18 : Protocole B-MAC	28
Figure 19 : Le lancement du simulateur OMNeT++	30
Figure 20 : Modélisation d'un réseau sous OMNeT++	30
Figure 21 : Interface de développement du simulateur OMNeT++	31
Figure 22 : Les Nœuds et leurs connections en Castalia.....	32
Figure 23 : La vue d'un nœud sous Castalia	33
Figure 24 : Les répertoires de base de Castalia	34
Figure 25 : Le fichier SMAC.Ned en mode graphique.	35
Figure 26 : Le fichier SensorNetwork.ned.	36
Figure 27 : Fichier résultat.txt du Castalia	38
Figure 28 : L'énergie consommée par chaque nœud	39
Figure 29 : Nombre de paquets transmis.....	40
Figure 30 : détail des paquets reçus	41
Figure 31 : L'énergie moyenne consommée par plusieurs simulations en mode (écoute/veille)	42
Figure 32 : L'énergie moyenne consommée par plusieurs simulations sans mode veille	42

Liste des tableaux

Tableau 1 : une comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad hoc	11
Tableau 2 : exemple : Niveaux de consommation d'énergie du capteur mica2 [14].....	14
Tableau 3 : Les paramètres utilisés pour la simulation de protocole SMAC.....	37

Liste des abréviations

OSI:	Open Systems Interconnection
MANET:	Mobile Ad hoc Network
PC:	Personal Computer.
PDA:	Personal Digital Assistant.
PDU:	Protocol Data Unit.
SB:	Station de Base.
S-MAC:	Sensor-MAC.
TDMA:	Time Division Multiple Access.
WSN:	Wireless Sensor Network.
RCSF:	Réseau de Capteurs Sans Fil.
MAC:	Media Access Control.
FDM:	Frequency Division Multiplexing
TDM:	Time Division Multiplexing
LLC:	Logical Link Control
ARQ:	Automatic Repeat ReQuest
FEC:	Forward Error Correction
CSMA/CD:	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
TDD:	Time Division Duplexing
UDG:	Unit Disk Graph
CC-MAC:	Correlation Based Collaborative Medium Access Control
CDMA:	Code Division Multiple Access
OFDM:	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
RTS:	Request To Send
CTS:	Clear To Send
ACK:	Accusé de réception.
T-MAC:	Timeout MAC
B-MAC:	Berkeley MAC

Introduction Générale

Durant cette dernière décennie, les technologies de communications sans fil se sont introduites à tous les niveaux de la société : les entreprises, les gares, les hôpitaux, les usines, dans les domiciles, dans les téléphones et autres équipements domestiques. Ces avancées récentes offrent de nouvelles perspectives d'avenir dans plusieurs domaines d'applications : militaire, santé, environnement. Elles ont permis particulièrement le développement de microcomposants appelés : capteurs. Ces derniers intègrent : une unité de captage chargée de l'acquisition des données (température, pression, vibrations), une unité de traitement informatique et de stockage de données et un module de transmission sans fil. Ces capteurs sont de véritables systèmes embarqués qui ont pour objectif la collecte et la transmission des données capturées.

Les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks; WSN) sont considérés comme un type spécial de réseaux ad hoc, composés d'un grand nombre de capteurs matériellement petits, et placés généralement près des objets auxquels ils s'intéressent dans les environnements où ils sont déployés. Ces capteurs sont capables de récolter, traiter et acheminer les données environnementales de la région surveillée d'une manière autonome, vers des stations de collecte appelées nœuds puits (Sink) ou stations de base (BS). Ce dernier peut être connecté à l'utilisateur du réseau via Internet ou un satellite. Ainsi, l'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises et récolter les données environnementales captées par le biais du nœud puits.

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

L'objectif principal de notre travail est de s'initier au domaine des réseaux de capteurs sans fil : étudier le protocole Sensor MAC (SMAC) et de le simuler par l'utilisation de la plateforme de simulation des RCSFs « Castalia » et le simulateur OMNeT++.

Organisation du document :

Le plan de travail constitué de trois chapitres :

- ✓ Les réseaux de capteurs sans fil : Concepts et domaines d'application
- ✓ La description du protocole SMAC (Sensor MAC)
- ✓ Simulation de protocole SMAC pour les RCSFs

Dans le premier chapitre, nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil : leurs architectures de communication et leurs domaines d'applications. Nous discuterons également la pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil. Nous terminerons le chapitre par quelques détails sur la couche MAC dans les réseaux de capteurs sans fil.

Dans le deuxième chapitre, Nous présenterons les Propriétés et la Classification des protocoles MAC. Par la suite, nous citerons les informations de base du protocole SMAC importants proposés pour les RCSFs. Nous décrivons le protocole et présentons ses avantages et ses inconvénients.

Dans le dernier chapitre, nous détaillerons notre simulation de protocole S-MAC pour la conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil et nous discuterons les résultats obtenus.

Introduction

Les réseaux de capteurs vont permettre de changer notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec l'environnement physique qui nous entoure en envahissant une gamme d'applications très variée. Ils sont composés de capteurs qui communiquent en sans fil et qui sont dotés de capacité de calcul permettant de faciliter une série d'applications irréalisables ou trop chères il y a quelques années. Aujourd'hui, des capteurs minuscules et bon marché peuvent être littéralement éparpillés sur des routes, des structures, des murs ou des machines, capables de détecter une variété de phénomènes physiques.

Les réseaux de capteurs sans fil sont considérés comme un type spécial de réseaux ad-hoc. Ils apportent une perspective intéressante: celle de réseaux capables de s'auto-configurer et de s'auto-gérer sans qu'il y ait besoin d'interventions humaines. Les nœuds sont généralement déployés de manière aléatoire à travers une zone géographique, appelée zone d'intérêt.

Les données récoltées sont acheminées grâce à des communications sans fil en multi-saut (C.-à-d. de proche en proche) à une station de base (ou puits).

Dans ce chapitre, nous présenterons Les réseaux sans fil (Ad hoc), leurs applications, etc. par la suite, nous présenterons les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication et leurs applications.

I. Les réseaux Ad hoc

Les systèmes de communication cellulaire sont basés essentiellement sur l'utilisation des réseaux filaires (tel que Internet) et la présence des stations de base qui couvrent les différentes unités mobiles du système. Les réseaux mobiles "ad hoc" sont à l'inverse, des réseaux qui s'organisent automatiquement de façon à être déployables rapidement, sans infrastructure fixe, et qui doivent pouvoir s'adapter aux conditions de propagation, aux trafics et aux différents mouvements pouvant intervenir au sein des nœuds mobiles. [1]

Description détaillée sur les réseaux ad hoc :

Chaque entité ((**node**) nœud) communique directement avec sa voisine. Pour communiquer avec d'autres entités, il lui est nécessaire de faire passer ses données par d'autres qui se chargeront de les acheminer. Pour cela, il est d'abord primordial que les entités se situent les unes par rapport aux autres, et soient capables de construire des routes entre elles: c'est le rôle du protocole de routage. [2]

1. Les topologies de réseaux sans fil

La topologie du réseau peut changer à tout moment, elle est donc dynamique et imprévisible ce qui fait que la déconnexion des unités soit très fréquente.

Exemple :

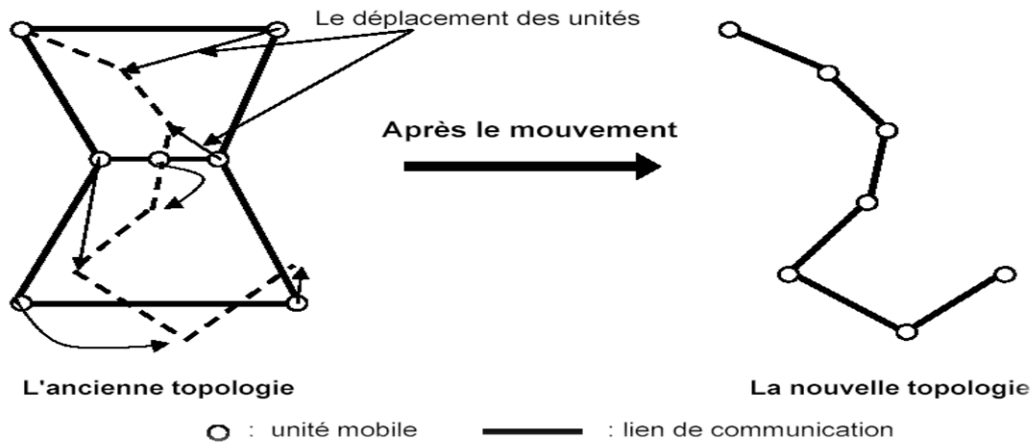


Figure 1 : Le changement de la topologie des réseaux ad hoc [1]

2. Le modèle des environnements mobiles

Un environnement mobile est un système composé de sites mobiles et qui permet à ses utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs positions géographiques. Les réseaux mobiles ou sans fil, peuvent être classés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure (Ad-hoc). [1]

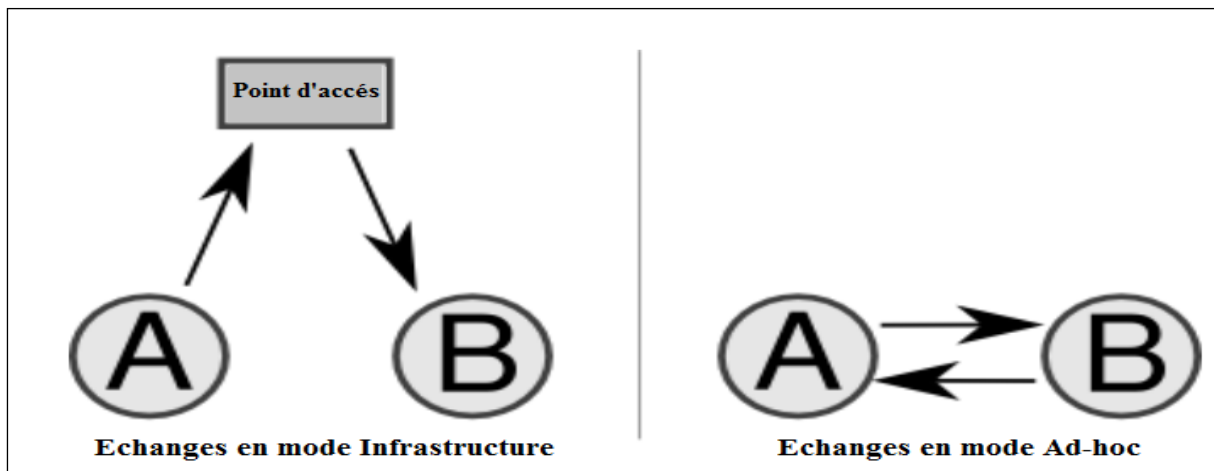


Figure 2 : Les échanges dans les modes Infrastructure et sans Infrastructure (Ad-hoc)

a. Réseau sans infrastructure (*Réseaux Ad-Hoc*)

Dans le mode sans infrastructure, appelé aussi réseau **Ad-Hoc**, les nœuds du réseau communiquent entre eux en utilisant leur interface de communication sans fil. Dans ces réseaux, les unités se connectent les unes aux autres afin de constituer un réseau point à point, c'est-à-dire un réseau dans lequel chaque unité joue en même temps le rôle de client et celui

de point d'accès. Ainsi, chaque nœud communique directement avec les nœuds se trouvant à sa portée. Quant aux nœuds se trouvant hors de sa portée, la communication se fait en passant par des nœuds intermédiaires qui se chargent de trouver un chemin vers le nœud destinataire. On parlera ainsi de routage multi-saut (multi-hop).

b. Réseau avec infrastructure :

Dans les réseaux sans fil avec infrastructure, les communications entre les nœuds se font via un point d'accès qui peut être relié à un réseau fixe. Les nœuds du réseau ne peuvent pas communiquer entre eux, ils doivent obligatoirement passer par un point d'accès. Chaque point d'accès définit une région appelée cellule. La cellule correspond à la zone de couverture à partir de laquelle les unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages provenant d'autres nœuds. Notons qu'il est possible de relier plusieurs points d'accès entre eux par des liens filaires ou un réseau sans fil. [2]

3. Les réseaux mobiles Ad hoc

L'évolution récente de la technologie dans le domaine de la communication fil et l'apparition des unités de calculs portables (les laptops par exemple) poussent aujourd'hui les chercheurs à faire des efforts afin de réaliser le but des réseaux : [1]

"L'accès à l'information n'importe où et n'importe quand".

4. Définition

Un réseaux Ad Hoc appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc Network), est composé d'un ensemble relativement dense de nœuds mobiles qui se déplacent librement dans une certaine zone géographique sans aucune infrastructure fixe préexistante. Un nœud dans le réseau ad hoc communique avec un autre nœud directement (en utilisant son interface sans fil), si ce dernier est dans sa portée de transmission, ou indirectement par l'intermédiaire d'autres nœuds du réseau dans le cas contraire. Chaque nœud dans le réseau ad hoc doit se comporter comme un terminal, et aussi comme un routeur, et participer à la découverte et la maintenance des routes entre les nœuds du réseau. [4]

5. Applications

En plus de leurs utilisations dans les applications tactiques militaires, les réseaux ad hoc sont utilisés également dans les domaines civils. On peut citer :

- **Les opérations de recherche et de secours** : en cas de tremblement de terre, de feux ou d'inondation, dans le but de remplacer rapidement l'infrastructure détruite.
- **Les entreprises** : dans le cadre d'une réunion ou d'une conférence.
- **Les gares et aéroports** : pour la communication et la collaboration entre les membres du personnel. [4]
- **Les services d'urgence** : opération de recherche et de secours des personnes, tremblement de terre, feux, etc.

- **Liaison sans fil** : le seul moyen de communication dans les réseaux ad-hoc est l'utilisation d'une interface sans fil. Le débit réel des communications sans fil entre les nœuds de réseaux ad-hoc est souvent inférieur aux taux de transfert théorique à cause de l'atténuation du signal, du bruit et des interférences. [6]
- **Une bande passante limitée** : Une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste.
- **Multi-hops ou multi saut** : Un réseau ad hoc est qualifié par « Multi-hops », car plusieurs nœuds mobiles peuvent participer au routage et servent comme routeurs intermédiaires.

Depuis quelques années, un nouveau type de réseaux dérivé des réseaux Ad-Hoc a vu le jour : « les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) ».

II. Les réseaux de capteur sans fil

1. Introduction aux réseaux de capteur sans fil

Avec l'essor de l'informatique mobile et les progrès réalisés en microélectronique, de nouveaux environnements ont vu le jour : les réseaux de capteurs sans fil.

Formés d'un ensemble de dispositifs miniatures déployés dans des environnements parfois hostiles capables de capter, traiter, mémoriser et transmettre des données, ces réseaux suscitent de plus en plus d'intérêt.

Ce nouveau type de réseaux, basé sur un travail collaboratif, s'ouvrent à une multitude de domaines d'applications: militaire, sécurité civile (surveillance des risques d'incendie, des catastrophes naturelles, des centrales nucléaires...), transport, santé, etc. Les WSNs peuvent améliorer d'une manière significative la qualité de vie.

2. Définitions d'un réseau de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs utilisent un grand nombre de dispositifs très petits, nommés «nœuds capteurs », pour former un réseau sans infrastructure établie. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de détecter son environnement et de traiter l'information au niveau local ou de l'envoyer à un ou plusieurs points de collecte (Sink), à l'aide d'une connexion sans fil. [2]

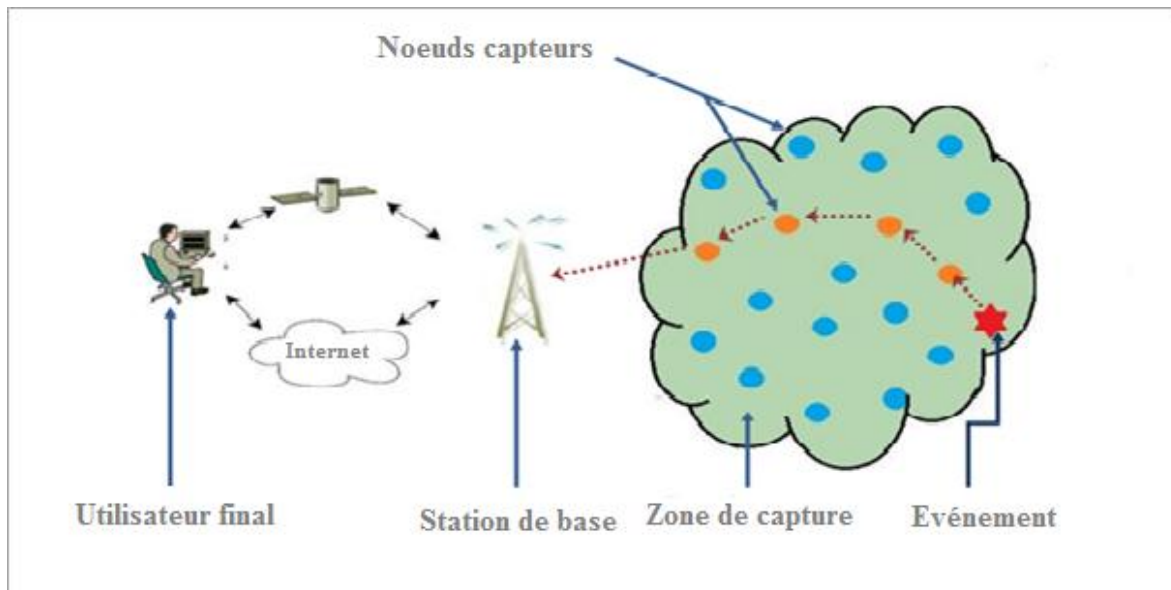


Figure 4 : Réseau de capteurs sans fil [3]

3. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Un RCSF se compose d'un certain nombre de capteurs (des centaines voire des milliers) dispersés dans une zone géographique appelée *champ de captage*, afin de surveiller l'environnement où il a été déployé et collecter des informations pour réaliser des traitements et des actions particulières. Les capteurs sont chargés de collecter périodiquement des données et de les envoyer vers un nœud particulier appelé *nœud puits* (Sink ou station de base). Ce dernier analyse ces données et transmet à son tour l'information collectée à l'utilisateur via internet ou satellite (Figure 5).

Le nœud puits est responsable, en plus de la collecte des rapports, de la diffusion des demandes sur les types de données requises par les capteurs via des messages de requêtes. Notons qu'un réseau de capteurs peut contenir plusieurs nœuds puits diffusant des intérêts différents. Ainsi, l'usager peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises et récolter les données environnementales captées par le biais du nœud puits. [7]

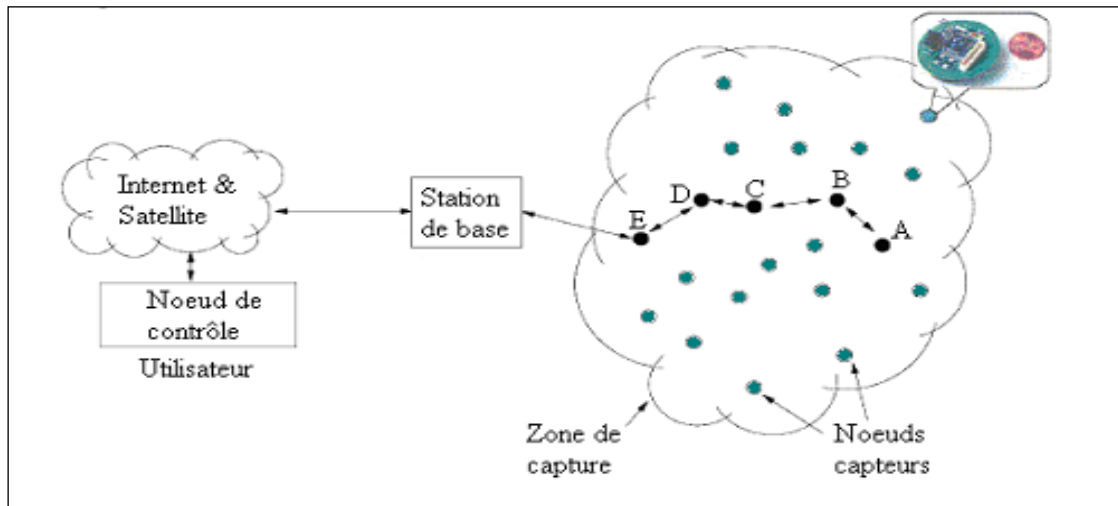


Figure 5 : Architecture simplifiée d'un réseau de capteurs sans fil [8]

4. Configuration matériel d'un nœud de capteur

Un nœud dans un réseau de capteurs peut être un dispositif de mesure, un dispositif d'interaction ou les deux en même temps [8]. Les capteurs sont des petits appareils qui peuvent détecter des événements dans les environnements où ils sont déployés, et qui sont capables de communiquer entre eux.

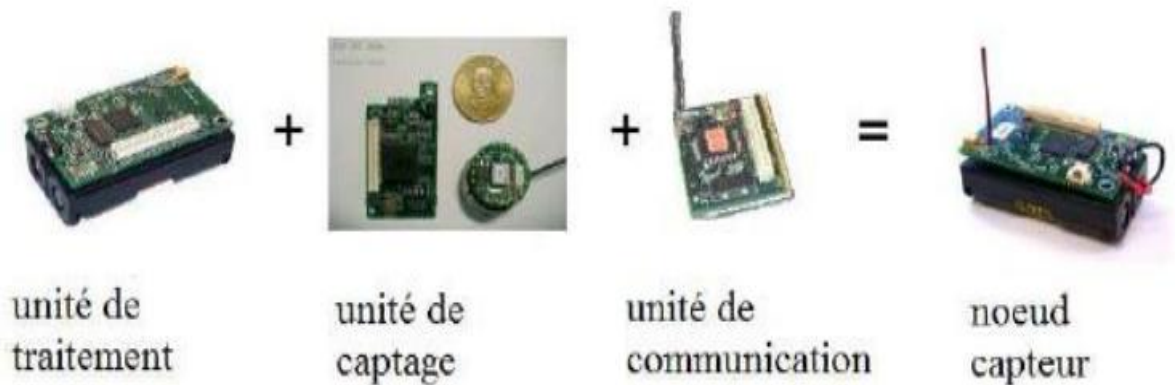


Figure 6 : Exemple d'un capteur

Un nœud capteur est composé de quatre unités principales, qui sont présentées dans la Figure 7 :

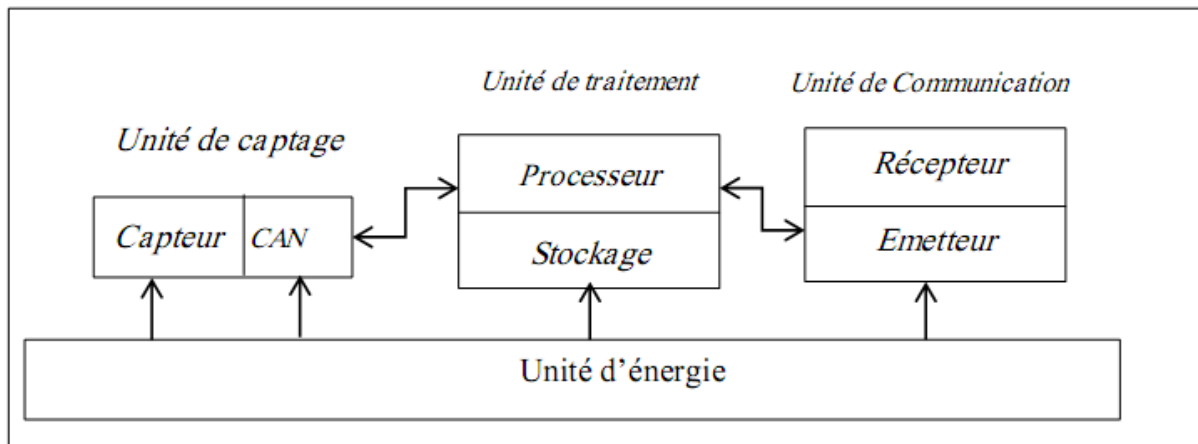


Figure 7: Composition d'un capteur [8]

a. Unité de captage : Se compose généralement de deux sous unités : un capteur et un convertisseur analogique-numérique (CAN). Les signaux analogiques mesurés par le capteur sont convertis en signaux numériques (digitaux) et sont transmis à l'unité de traitement.

b. Unité de traitement : Possédant d'un microprocesseur associé à une unité de stockage. Cette unité est responsable d'exécution des calculs sur les données captées et les conserver dans une mémoire au temps convenable. [8]

c. Unité d'énergie : C'est le système le plus important au niveau du nœud. Le capteur doit disposer de sa propre source d'énergie qui alimente le reste des unités. Cette unité se trouve généralement sous la forme de batterie de basse tension non renouvelable. De ce fait, la durée de vie du capteur dépend complètement de cette unité. [8]

d. Unité de communication : Elle permet au capteur de communiquer avec les autres au sein du réseau. Elle est le plus souvent constituée d'un transceiver radio.

5. Description du transceiver

Le transceiver est chargé de transmettre ou recevoir les paquets de données en utilisant un dispositif de communication sans fil. Ce dernier constitue généralement une antenne radio à faible portée afin d'économiser l'énergie des nœuds capteurs. L'unité de transmission doit aussi contenir des circuits de modulation, démodulation, filtrage et multiplexage, pour le traitement du signal radio. [9]

Il permet de connecter le nœud à l'ensemble du réseau par le biais d'un système radio. Grâce à cette unité, le nœud pourra émettre et recevoir des messages des autres nœuds. Il peut fonctionner en quatre modes : Transmettre, recevoir, écoute non-active et endormi. [10]

6. Comparaison d'un réseau RCSF avec les réseaux ad hoc

Les MANETs et les WSNs partagent quelques points communs mais quelques fois avec un poids différent. Le tableau suivant résume les similitudes et les différences entre les réseaux de capteurs sans fil et les réseaux ad hoc.

Réseau de capteurs sans fil	Réseau MANET
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.
Un objectif ciblé.	Générique/communication.
Les nœuds collaborent pour remplir un objectif.	Chaque nœud a son propre objectif.
Flot de données « many-to-one ».	Flot « 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 : une comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad hoc

7. La pile protocolaire des réseaux de capteurs sans fil

Les piles protocolaires sont développées pour faciliter et standardiser la communication entre les composants d'un réseau. Cette pile comprend cinq couches et trois niveaux ou plans pour la gestion d'énergie, de mobilité et des tâches. Chaque couche de ce modèle communique avec les couches adjacentes et fournit des services à celles supérieures.

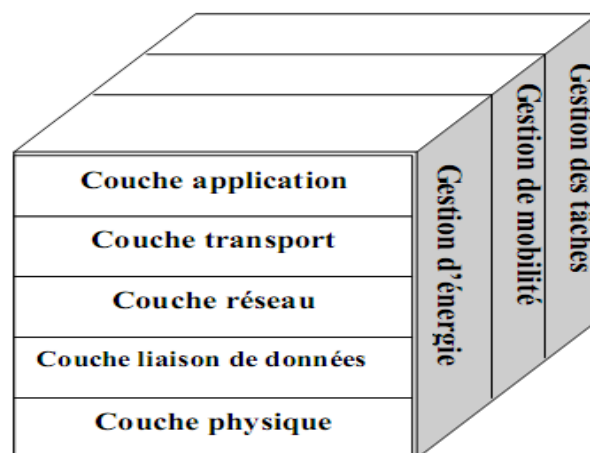


Figure 8 : Modèle en couches du réseau de capteurs sans fil [11]

7.1. Le rôle de chaque couche

a. Couche physique : Matériels pour envoyer et recevoir les données, assure la transmission et la réception des données au niveau bit.

b. Couche liaison de données : Elle définit les procédures d'accès au support de transmission en vue de contrôler les erreurs et d'éventuelles collisions. Elle assure la liaison point à point et multipoints entre les nœuds capteurs.

c. Couche réseau : Routage et transmission des données, elle gère les échanges et éventuellement les connexions à travers les réseaux de capteurs, elle gère entre autre l'adressage et l'acheminement des données. [10]

d. 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.

e. Couche application : Cette couche assure l'interface avec les applications au haut niveau. Il s'agit donc du niveau le plus proche des utilisateurs, géré directement par les logiciels.

▪ Les niveaux de gestion dans les réseaux de capteurs sans fil :

Les niveaux de gestion propres aux réseaux de capteurs sans fil sont les suivants :

- ❖ **Le niveau de gestion d'énergie :** ce niveau qui gère l'énergie consommée par les capteurs.
- ❖ **Le niveau de gestion de la mobilité :** ce niveau détecte et enregistre le mouvement des nœuds capteurs et permet de maintenir l'itinéraire d'un capteur vers un utilisateur et garder la trace de l'emplacement de ses voisins.
- ❖ **Le niveau de gestion des tâches :** Balance les tâches entre les nœuds afin d'économiser de l'énergie.

8. Quelques applications de RCSF

Nous présentons dans ce qui suit quelques applications récentes, plus évoluées et plus importantes : [12]

- **Le bâtiment :** L'installation d'un RCSF à l'intérieur d'un bâtiment permet de remédier efficacement au problème de perte d'énergie (mauvaise ventilation, mauvais usage d'air conditionné, etc.). ils sont utilisés généralement pour un meilleur contrôle de la température et de l'humidité, ce qui augmente le niveau de confort des habitants.
- **Surveillance des machines industrielles :** L'idée est de fixer des capteurs sur des endroits difficiles d'accès afin de détecter des événements qui indiquent le besoin de maintenance (vibration, fumée, bruits et nuisances etc.).
- **Surveillance militaire :** Les premières applications potentielles des réseaux de capteurs sans fil ont concerné le domaine militaire. L'idée est de déployer des nœuds nanoscopiques, et donc invisibles, sur un champ de bataille pour surveiller les mouvements des ennemis.

- **Applications environnementales :** Les RCSFs peuvent donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par suite faciliter la lutte contre les incendies, la pollution et analyser la qualité d'air, etc.).
- **Applications médicales :** Dans le domaine de la médecine, les RCSFs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (surveillance de la glycémie, détection de cancers à l'étape précoce, etc.).

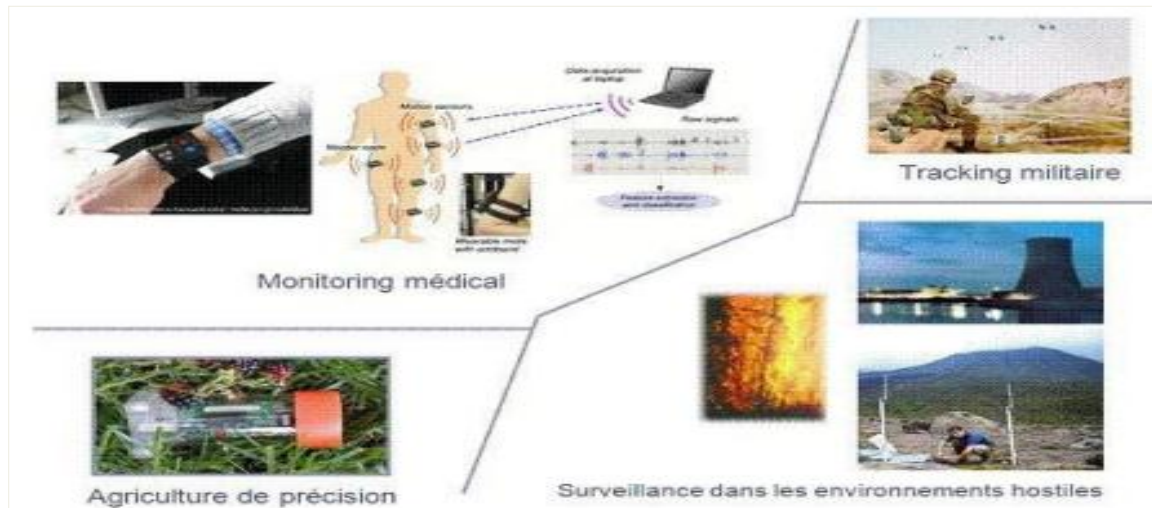


Figure 9 : Les différentes applications des RCSF

9. Accès medium dans les réseaux de capteur sans fil

La couche MAC dans un réseau de capteurs sans fil développera par le temps dans l'objectif de réduire au maximum le coût énergétique. La sous couche MAC assure l'accès au support de transmission, la fiabilité de transmission, le contrôle de flux, la détection d'erreur et la retransmission des paquets.

Puisque les nœuds partagent le même médium de transmission, la sous-couche MAC joue un rôle important pour la coordination entre les nœuds et la minimisation de la consommation d'énergie [15]. En effet, minimiser les collisions entre les nœuds permet de réduire la perte d'énergie.

10. MAC à efficacité d'énergie

La couche MAC (Media Access Control) ou couche d'accès au support est la couche logicielle qui permet d'organiser et contrôler l'accès multiple au médium (ou canal de communication). Les protocoles MAC fondés sur la méthode TDMA (Time Division Multiple Access) offrent une solution implicite : chaque nœud du réseau n'échange ses messages qu'à des intervalles de temps (slots) qui lui sont réservés ; il doit garder son transcepteur éteint durant le reste des slots pour économiser de l'énergie [13].

Le transceiver possède quatre modes de fonctionnement : transmission, réception, écoute non-active et endormi. Le Tableau 2 illustre les niveaux de consommation d'énergie d'un capteur de modèle « mica2 » [10]. Dans la plupart des cas, les consommations d'énergie en mode réception et en écoute non-active sont similaires et elles consomment environ la moitié du mode de transmission. Par contre, la consommation d'énergie en mode endormi est beaucoup plus basse. [14]

Etat	Consommation énergie (mW)
Transmission	80
Réception / non-actif	30
Endormi	0.003

Tableau 2 : exemple : Niveaux de consommation d'énergie du capteur mica2 [14]

Comme facteurs de consommation énergétique devant être réduits, ou idéalement évités dans les réseaux de capteurs, on dénombre :

- **Les collisions** : qui surviennent lorsque deux stations ou plus, se trouvant à portée radio les unes des autres, émettent des paquets au même moment, impliquant la perte des paquets et leur réémission.
- **L'overhearing** : qui peut être défini comme la réception par les nœuds de paquets ne leur étant pas destinés.
- **L'overhead** : représenté par la quantité de trafic de contrôle échangé dans le réseau.
- **idle listening (L'écoute passive)** : qui représente le temps où un nœud écoute le canal sans qu'il y ait de paquet à son adresse.
- **L'over-emitting** : que l'on peut définir comme étant l'émission de paquets vers un nœud ayant sa radio éteinte.

11. Modèle de calcul d'énergie

Heinzelman et al [17] proposent un modèle radio de consommation d'énergie (voir figure 10). Ainsi, les énergies nécessaires pour émettre $E_{Tx}(s, d)$ et recevoir $E_{Rx}(s)$ des messages sont données par :

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

$$E_{Tx}(s, d) = E_{Tx} \text{ elec}(s) + E_{Tx} \text{ amp}(s, d)$$

$$E_{Tx}(s, d) = (E_{elec} * s) + (E_{amp} * s * d^2)$$

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

$$E_{R_x}(s) = E_{R_x \text{ elec}}(s)$$

$$E_{R_x}(s) = E_{\text{elec}} * s$$

E_{elec} et E_{amp} représentent respectivement l'énergie de transmission électronique et d'amplification (voir figure 10).

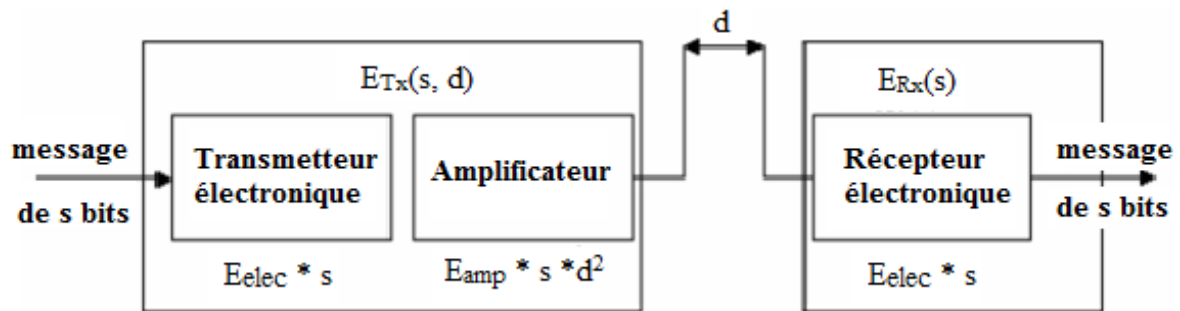


Figure 10 : Modèle de consommation d'énergie

Le module radio : Comme on vient de mentionner, Le module radio est le composant du nœud capteur qui consomme le plus d'énergie, car c'est le responsable de la communication entre les nœuds et le changement d'état du module radio doit être géré par un protocole de la couche MAC.

La radio opère en quatre modes différents [8] :

- **Etat transmission (TX) :** la radio transmet un paquet.
- **Etat réception (RX) :** la radio reçoit un paquet.
- **Etat idle (IDLE) :** la radio est allumée, mais il n'est en train de recevoir ni de transmettre.
- **Etat sommeil (SLEEP) :** la radio est mise en veille.

11.1. Modèles de communication dans les RCSF

Dans [23] [24], trois types de modèles de communication pour les RCSF sont définis : diffusion, convergecast et local gossip. [15]

- **Diffusion :** ce type de modèle de communication est utilisé par la station de base pour envoyer des informations à tous les nœuds du réseau. Les informations diffusées par la station de base peuvent inclure des paquets de contrôle pour le réseau entier, des mises à jour des programmes des nœuds capteurs ou une requête.
- **Convergecast :** si un nœud détecte un évènement, il envoie ce qu'il a perçu à un nœud spécifique qui peut être un cluster Head, une station de base ou un centre de fusion de données.

- **Local gossip** : si un nœud détecte un évènement, il envoie ce qu'il a perçu à tous les nœuds qui appartiennent à sa portée de transmission. La communication des différents nœuds est locale.

12. Fonctionnement de la couche MAC en mode économie d'énergie

Les protocoles de la couche MAC essaient de placer le composant radio en veille le plus souvent possible. Les problèmes de transmission peuvent également être une forte source de consommation énergétique. La transmission simultanée de deux trames risque de générer une collision et peut déclencher la retransmission des données. Ces transmissions simultanées peuvent être causées par une mauvaise coordination entre les nœuds ou au problème du terminal caché [8].

Le protocole MAC doit donc être robuste face aux Problèmes de transmission tout en limitant son impact sur la Consommation énergétique. Pour réduire drastiquement la consommation énergétique des nœuds, la solution principale consiste à placer le composant radio en mode veille le plus souvent possible. Ceci risque cependant de poser un problème de synchronisation. En effet, les données seront perdues si la radio d'un nœud est en veille lorsqu'une transmission lui est adressée. Les protocoles MAC adaptés aux réseaux de capteurs sans fil devront faire en sorte que la source et le destinataire d'une trame soient éveillés durant la même période pour que la transmission soit un succès.

III. La couche MAC

1. Les services MAC

Il y a plusieurs services :

- Encapsulation des paquets de données de la couche réseau dans des trames.
- Synchronisation des trames
- La sous-couche de contrôle de liaison logique (Logical link control LLC) :

Le contrôle d'erreur (Automatic Repeat reQuest, ARQ), en plus des ARQ fournis par quelques protocoles de la couche transport, des techniques forward error correction (FEC) fournies par la couche physique, et de la détection d'erreur et l'annulation de paquets fournis à toutes les couches, notamment la couche réseau. Le contrôle d'erreur de la couche de liaison de données (c'est-à-dire, la retransmission de paquets erronés).

- La sous-couche de contrôle d'accès au support (Media Access Control - MAC) : protocoles d'accès multiple pour le contrôle d'accès au canal, par exemple les protocoles CSMA/CD pour la détection de collision et la retransmission dans les réseaux à bus Ethernet et les réseaux à concentrateurs (hubs), ou le protocole CSMA/CA pour l'évitement des collisions dans les réseaux sans-fils.
- La gestion de files d'attente des paquets de données ou leur ordonnancement. [20]

2. La trame MAC

Il y a trois principaux types de trames :

- **Les trames de données** : utilisées pour la transmission des données
- **Les trames de contrôle** : utilisées pour contrôler l'accès au support (eg : RTS, CTS, ACK)
- **Les trames de gestion** : transmises de la même façon que les trames de données pour l'échange d'informations de gestion, mais qui ne sont pas transmises aux couches supérieures.

Chacun de ces trois types est subdivisé en différents sous-types, selon leurs fonctions spécifiques [16].

2.1. Format des trames de contrôle

Les trames MAC sont constituées d'un en-tête, d'un corps et d'un FCS (Frame Check Sequence).

- Le corps de la trame contient les données.
- Le champ de contrôle de l'en-tête de la trame contient des informations telles que le protocole utilisé et le type de trame transmise.
- Le champ "durée/ID" contient la durée de la transmission de la trame, cette valeur dépend du codage de la couche Physique et de la longueur de la trame.

La trame d'acquittement (ACK : "ACKnowledgement") : permet à l'émetteur d'une trame de s'assurer de sa bonne réception.

Structure d'une trame de contrôle RTS

Contrôle de trame	Durée	Adresse RA	Adresse TA	CRC
2 octets	2 octets	6 octets	6 octets	4 octets

Structure d'une trame de contrôle CTS ou ACK

Contrôle de trame	Durée	Adresse RA	CRC
2 octets	2 octets	6 octets	4 octets

Figure 11 : Format de Trames de contrôle

2.2. Format d'une trame de données

- Les champs "adresse" contiennent respectivement :
 - l'adresse du destinataire des données contenues dans le corps du paquet
 - l'adresse de la source des données contenues dans le corps du paquet.
 - l'adresse de la station à laquelle cette trame est envoyée
- lorsque cette station est une station relais Le champ de contrôle de séquence
 - stocke le numéro de la trame
 - le numéro de fragment (si les données ont été fragmentées en plusieurs trames).

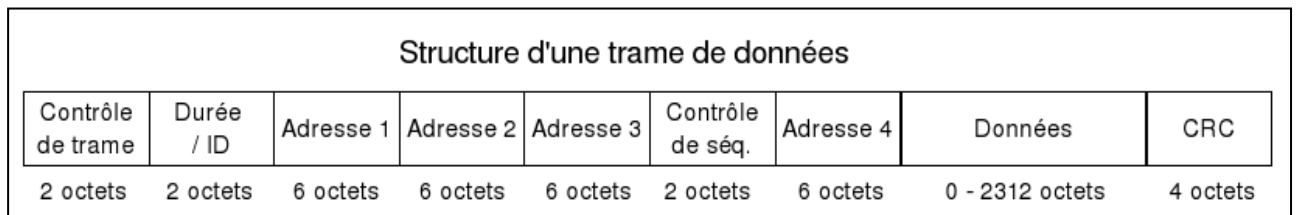


Figure 12 : Format général d'une trame de données

3. Rappel sur le CSMA/CD d'Ethernet

3.1. Généralités

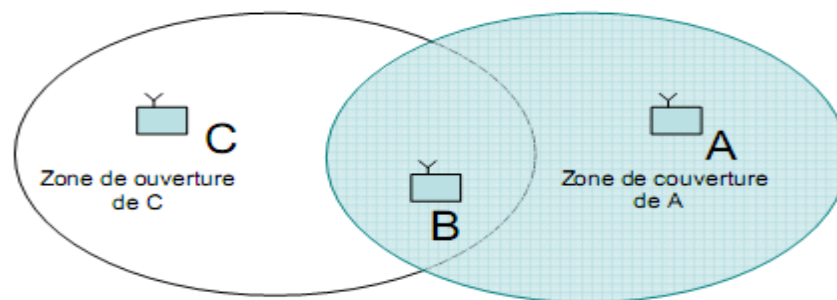
En CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), avant toute tentative de transmission, une station s'assure que le canal n'est pas déjà utilisé (détection de porteuse), auquel cas la transmission est remise à un instant ultérieur. Quand le canal est détecté libre, après une durée aléatoire, si le canal est resté libre, la station envoie son paquet. Mais cette détection de porteuse ne suffit pas pour s'assurer que le paquet est reçu correctement. En effet, une ou plusieurs stations peuvent effectuer cette procédure et envoyer leurs messages simultanément et causent une collision, notamment quand le réseau est chargé.

En cas de transmission simultanée, le seuil de la puissance est violé et une violation du codage utilisé lors de la transmission peut être détectée. Les stations arrêtent alors de transmettre et tentent de retransmettre en répétant le même processus après des durées aléatoires. [16]

3.2. Problème du CSMA dans le cas des réseaux sans fil

Si les mécanismes de détection de collisions s'avèrent adaptés pour un réseau local câblé, ils ne le sont pas, en général, pour les réseaux radio. Plusieurs raisons pour cela :

- Dans un environnement sans fil, on ne peut pas être sûr que toutes les stations s'entendent entre elles (ce qui est l'hypothèse de base du principe de détection de collision), et le fait que la station voulant transmettre teste si le support est libre, ne veut pas forcément dire que le support est libre autour du récepteur.
- Le problème des stations cachées : Ce problème se produit quand deux stations ne peuvent pas s'entendre l'une et l'autre du fait que la distance qui les sépare est trop grande ou qu'un obstacle les empêche de communiquer entre elles mais elles ont des zones de couverture qui se recoupent. Si les stations A et C ne font que la détection de porteuse en écoutant le canal, n'étant pas en mesure de s'entendre l'une de l'autre, elles vont s'autoriser à émettre des paquets même temps à une station B située dans l'intersection des zones de couverture, il va y avoir collision entre les paquets et donc B ne pourra recevoir aucune des communications. On dit que les stations A et C sont cachées l'une par rapport à l'autre. [16]



Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant étant donné la diversité des domaines d'applications. Contrairement aux réseaux traditionnels qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service, les réseaux de capteurs doivent, en plus, prendre en compte la conservation d'énergie. Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque nœud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable. Dans ce chapitre, nous avons présenté aussi La couche MAC dans un réseau de capteurs sans fil et quelques détails concernées.

Introduction

Les réseaux de capteurs sont composés d'un grand nombre de nœuds pour couvrir la zone cible. Nœuds de réseau de capteurs sans fil communiquent les uns avec les autres pour donner une tâche commune. Comment utiliser efficacement la quantité limitée d'énergie a été la principale préoccupation dans la conception de protocoles MAC pour les réseaux de capteurs. Le but de ces supports est de transporter un flot de bits d'information d'une source vers une destination. Le médium de transmission est un dispositif commun pour tous les nœuds du réseau, il nécessite donc un mécanisme qui gère l'accès des nœuds pour déterminer le droit d'émettre de chacun d'entre eux dans le réseau.

Quelques protocoles MAC pour les RCSFs sont détaillés dans ce chapitre. Une brève liste des propriétés désirées dans les protocoles MAC devance la description du comportement de ces protocoles qui sont suivis par une nouvelle vision dans l'univers des réseaux où les couches communiquent entre eux dont l'objectif est de détailler et de simuler l'efficacité du réseau.

I. Protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil

Avant d'examiner les différents protocoles MAC, il est nécessaire de comprendre les propriétés, et la classification des protocoles MAC. Ceci nous permet de mieux comprendre ces protocoles. Dans la section suivante (1.), nous décrivons les différentes propriétés souhaitées dans un protocole MAC. Dans la section (2), nous fournirons une classification des protocoles proposés, et finalement nous présenterons l'aperçu de quelques protocoles dans ce qui reste de cette partie d'état de l'art.

1. Propriétés souhaitées d'un protocole MAC bien défini

Pour concevoir un bon protocole MAC pour le réseau de capteurs sans fil, nous devons considérer les attributs (métriques) suivants :

- **Optimisation d'énergie** : L'attribut le plus important et le plus commun est l'efficacité énergétique (consommer moins et offrir plus de services de qualité). Différents nœuds dans un réseau de capteurs sont alimentés par des batteries, et il est difficile de les remplacer ou les recharger. D'ailleurs, on s'attend à ce que les nœuds de capteurs soient assez peu coûteux qu'ils soient jetés plutôt que d'être rechargés. Par conséquent, maximiser la vie du réseau des nœuds de capteurs est une issue critique. 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.
- **Le passage à l'échelle et l'adaptabilité** : Comme les réseaux de capteurs sont des réseaux dynamiques que ce soient aux niveaux de leurs tailles, leurs densités ou leurs topologies. Aussi les nœuds meurent avec le temps, ou se détachent du reste du réseau, et de nouveaux nœuds peuvent être ajoutés ou réintégrés au réseau ou être déplacés à des endroits différents. Ces raisons peuvent changer la connectivité et la topologie du réseau (des chemins disparaissent et de nouveaux sont définis). Un bon protocole

MAC devrait efficacement s'adapter à ces changements. Ces attributs sont des soucis secondaires pour la conception d'un protocole MAC efficace.

- **La bande passante (ou capacité du canal)** : c'est une caractéristique importante, En effet le débit est un objectif secondaire pour les WSN. 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.
- **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.

2. Classification des protocoles MAC

Les protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil se basant sur l'architecture du réseau, ils peuvent être classifiés dans deux grandes catégories: **distribué et centralisé**. Dans les réseaux sans fil distribués, les terminaux sans fil communiquent directement l'un avec l'autre sans avoir recours à un point de connexion intermédiaire. Ainsi, on le connaît comme réseau Ad hoc ou réseau sans infrastructure, la figure 13 illustre un réseau distribué typique.

Chaque borne sans fil a une interface sans fil et communique avec d'autres terminaux d'une façon distribuée. Un avantage des réseaux sans fil distribués est que le réseau ne s'effondre pas si un terminal fonctionne mal ou est mise hors tension. D'autre part, toutes les transmissions de données dans de tels réseaux doivent être faites dans la même bande de fréquence parce qu'il n'y a aucun nœud central pour convertir une bande de fréquence à une autre. Par conséquent, les réseaux sans fil distribués fonctionnent en mode de TDD (Time Division Duplexing).

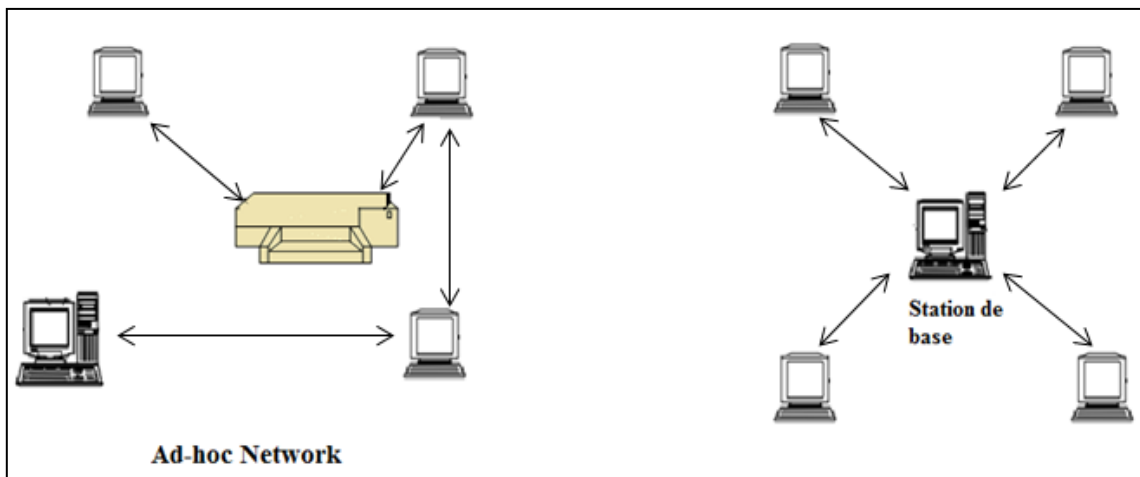


Figure 13 : Réseaux sans fil distribués et centralisés

Les réseaux sans fil centralisés se composent d'une station de base (BS) et de plusieurs terminaux sans fil. La station de base agit comme une interface entre les terminaux sans fil et un réseau câblé. La station de base communique avec les terminaux sans fil par des messages

à diffusion générale (broadcasting). D'autre part, tous les terminaux sans fil partagent le même canal d'accès multiple en se rapportant à la station de base. La figure 13 expose les réseaux sans fil centralisés typiques.

Les protocoles MAC sans fil peuvent encore être répartis dans les catégories des protocoles d'accès sélectif, les protocoles d'accès garantis, et les protocoles d'accès *hybride*. La figure 14 représente cette classification.

- **Un protocole d'accès sélectif** : les terminaux sans fil conquièrent pour accéder au médium. Si le médium est libre, un nœud peut transférer ses données avec succès. Si plusieurs nœuds tentent de transmettre en même temps, alors une collision se produit. Les nœuds résolvent la collision d'une façon ordonnée selon l'algorithme de résolution de contention.
- **Un protocole de garanti d'accès** : les nœuds accèdent au médium selon la façon round-robin; ils prennent le tour pour accéder au médium. Une méthode pour implémenter ce protocole est d'employer la configuration maître-esclave. Le maître vote chaque nœud, et le nœud envoie les données en réponse au vote. Une autre manière est d'échanger le jeton (token). Le nœud possesseur du jeton peut transmettre ses données. Quand le nœud achève la transmission de ses données, il passe le jeton au nœud suivant. Nous n'aborderons pas des protocoles d'accès hybride.
- **Un protocole d'accès 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.

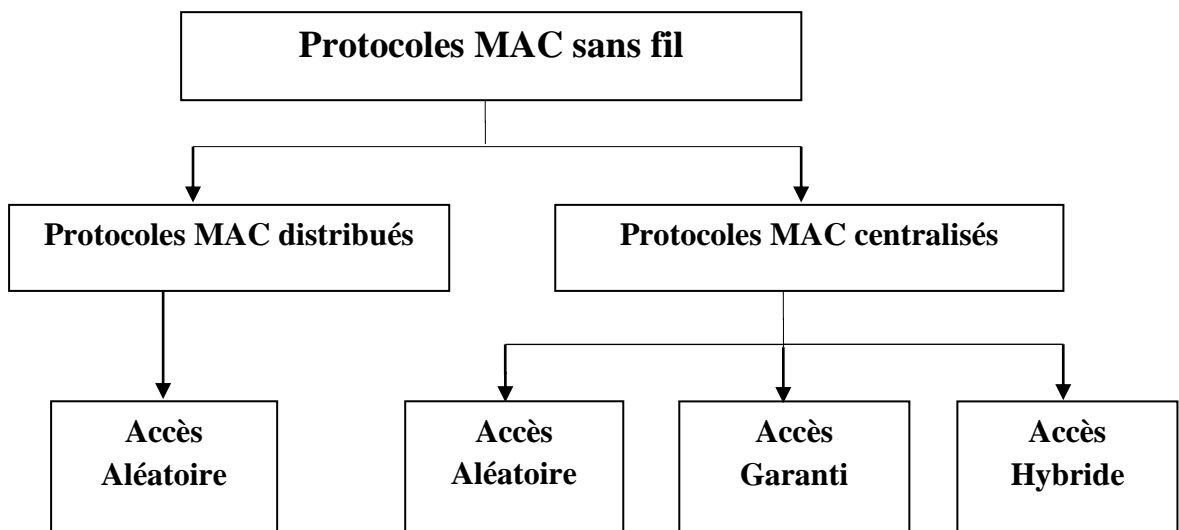


Figure 14 : Classification des protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil

II. Protocole de RCSF

Dans cette section, on présente les informations de base de protocole SMAC pour les réseaux de capteurs sans fil. Nous décrivons le protocole et présentons ses avantages et ses inconvénients.

1. Sensor-MAC (S-MAC)

Parmi les différents protocoles MAC proposés pour les réseaux de capteurs sans fil, S-MAC a probablement plus de travaux édités. S-MAC a été développé à l'université de la Californie, Los Angeles [26] par Ye et al [27]. Le but principal du protocole S-MAC est de réduire la consommation d'énergie provoquée par l'écoute de la porteuse à vide (idle listening), les collisions, l'interception, et les paquets de contrôle. En outre, le protocole supporte bien la scalabilité et évite les collisions par l'emploi combiné d'un calendrier et d'une méthode de gestion du contenu. Le protocole S-MAC possède quatre composants principaux :

1. L'écoute et veille périodiques,
2. L'évitement des collisions,
3. L'évitement de l'interception (Overhearing),
4. Le passage de message.

1. L'écoute et sommeil périodiques :

Dans de nombreuses applications de réseau de nœuds capteurs, les nœuds perdent de l'énergie pendant l'écoute infiniment de la radio alors qu'aucun événement de capture ne se produit. La quantité d'énergie consommée en mode d'écoute de la porteuse à vide est presque aussi grande que celle du mode réception. En revanche, la consommation d'énergie en mode sommeil est trois fois plus petite que celle relative au mode écoute de la porteuse à vide. Par conséquent, un nœud devrait être en mode veille autant que possible (tant que rien ne s'est produit). 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 15. 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 transceiver 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%.

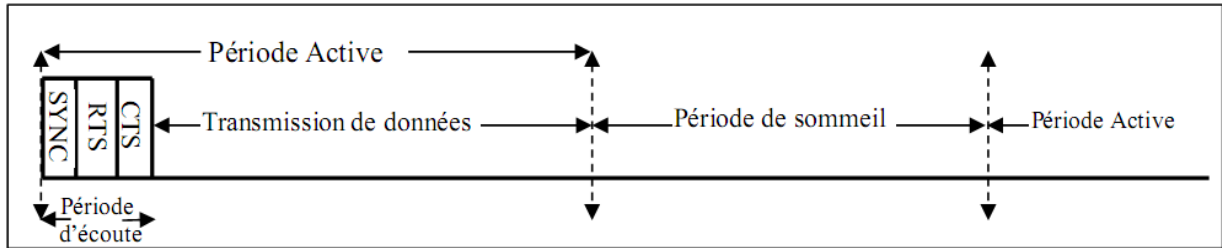


Figure 15: le cycle « écoute/veille » périodique du S-MAC [21].

Le protocole S-MAC supporte cinq types de trames:

- ❖ **SYNC** : Trame de synchronisation.
- ❖ **RTS (Request To Send)** : Requête envoyée par l'émetteur au récepteur lui demandant l'autorisation d'envoyer son paquet DATA.
- ❖ **CTS (Clear To Send)** : Réponse positif à la requête.
- ❖ **DATA** : Paquet de données.
- ❖ **ACK** : Accusé de réception d'informer un expéditeur que ce qu'il a envoyé a bien été reçu.

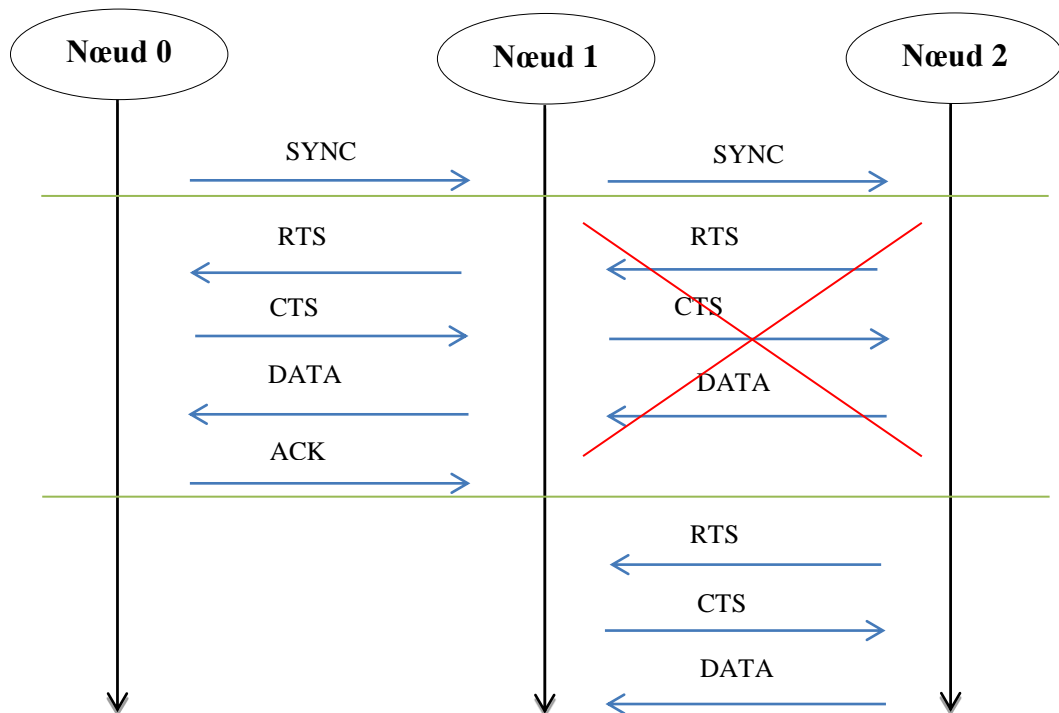


Figure 16 : Déroulement des opérations dans le protocole SMAC

Selon la figure ci-dessus, un nœud commence par envoyer des synchronisations afin de définir le niveau de chaque nœud par rapport au nœud qui synchronise. Si le nœud 1 a des données à envoyer au nœud 0 et qu'en même temps le nœud 2 a des données pour le nœud 1,

une sorte de compétition se met en place entre les deux nœuds (1 et 2) sur celui qui accèdera en premier au canal. Une fois qu'un des deux nœuds accède au canal (dans cet exemple, c'est le 1), suivant un choix d'implémentation par l'utilisateur [22], l'autre nœud peut, soit, réessayer tout de suite après la première tentative en espérant que l'autre communication n'a pas eu lieu, attendre un certain intervalle temporel fixé par l'utilisateur, ou bien attendre une autre trame de communication (610 ms par défaut).

Pour réduire la latence et les paquets de contrôle (RTS/CTS), le protocole S-MAC tente de coordonner et synchroniser le calendrier d'écoute/veille (sleep/listen Schedule). Un nœud peut choisir son propre calendrier de sleep/listen; cependant, on préfère que les nœuds voisins se synchronisent sur le même calendrier si possible, de sorte qu'ils écoutent et pivotent vers le mode veille en même temps. Chaque nœud maintient également une table des calendriers dans laquelle les calendriers de ses nœuds voisins sont stockés. Ceci assure que chaque nœud sait quand-t-il faut communiquer à d'autres nœuds même si ils possèdent des calendriers de sommeil différents. Un nœud choisit son calendrier selon les règles suivantes:

- Avant qu'un nœud bascule vers le mode mise en veille, il définit son propre calendrier de sommeil, et l'annonce dans un message de synchronisation « SYNC » à ses voisins. Un tel nœud s'appelle un synchroniseur car il dicte son calendrier à ces nœuds voisins qui se synchroniseront avec lui.
- Si un nœud reçoit un calendrier de l'un ses voisins avant qu'il puisse définir son propre calendrier, alors il adoptera le contenu de message SYNC. Un tel nœud est dite partisan. Un nœud, après avoir sélectionné son calendrier, attendra un moment aléatoire avant d'annoncer son calendrier dans un message SYNC à ses voisins.
- Si un nœud reçoit différents calendriers après avoir sélectionné son propre calendrier, il s'adoptera aux deux calendriers on se réveillant dans les lapses de temps de ses voisins et de lui-même.

La mise à jour du calendrier se fait de la même façon. Si un nœud modifie son calendrier, il le transmettra par un message SYNC à ses nœuds voisins.

2. L'évitement de la collision et l'interception :

L'évitement de la collision dans S-MAC suit un procédé semblable à celui utilisé dans la fonction des coordonnées distribuées (DCF) d'IEEE 802.11 pour le mode Ad hoc, en utilisant l'échange de paquets RTS/CTS. Si un nœud souhaite accéder au médium, mais perd le contentieux d'accès au médium, il passe au mode veille et se réveille quand le récepteur et le médium seront libres. Un nœud sait combien de temps faut-il pour dormir car il y a un champ durée en chaque paquet indiquant le temps nécessaire pour la transmission. Par conséquent, un nœud stocke cette valeur dans un compteur appelé le vecteur d'attribution de réseau (NAV) et initialise son temporisateur pour se réveiller ultérieurement.

L'évitement de l'interception est réalisée en obligeant des nœuds en interférence à se basculer vers le mode Sleep après qu'ils reçoivent un paquet de types RTS ou CTS. Quand-t-il y a lieu à une transmission active de données, un nœud pourrait intercepter ces paquets de

données qui exigent un bon moment de transmission. En employant l'échange de paquets de contrôles RTS/CTS, ce problème est résolu en aiguillant les nœuds en interférence vers le mode mise en veille.

3. Passage de message :

L'inconvénient d'envoyer un message long en un seul paquet est le coût élevé de la retransmission du paquet si seulement peu de bits du paquet sont corrompus. Par conséquent, dans le protocole S-MAC, de longs messages sont réduits en fragments dans de petits paquets et envoyés avec seulement un message de RTS et un de CTS. Pendant la transmission, le médium est réservé pour le message complet. Ceci permet de gagner le temps requis pour l'envoi répétitif des messages de RTS/CTS pour chaque paquet. Chaque fois qu'un fragment est envoyé, l'expéditeur attend un ACK du récepteur avant d'envoyer le prochain fragment. Si l'expéditeur ne recevait pas un ACK, il retransmettrait immédiatement le fragment courant. Un inconvénient de cette approche est qu'un nœud qui veut envoyer un message court il se peut qu'il devra attendre longtemps jusqu'à ce que le long message soit complètement envoyé afin de libérer le médium.

❖ **Les avantages :**

- ✓ La perte d'énergie causée par l'écoute au canal libre est réduite par le cycle de mise en veille.
- ✓ Le protocole est simple.

❖ **Les inconvénients :**

- ✓ Le protocole n'est pas scalable. L'augmentation de nombre de nœuds implique l'augmentation de nombre des Schedule sauvegardés dans chaque nœud.
- ✓ La latence est augmentée puisque les messages doivent attendre la période d'écoute pour être envoyés.
- ✓ L'utilisation d'une période d'écoute fixe cause l'écoute à un canal libre s'il n'y a pas de données à transmettre pendant cette période.
- ✓ La période fixe est déterminée avant le déploiement des nœuds, ce qui n'est pas adaptatif car le réglage optimal dépend aussi du taux des événements observés qui peut changer avec le temps.
- ✓ Le débit moyen est réduit, car seulement la période d'activité est utilisée pour la communication.

2. Autres protocoles MAC

Il existe plusieurs protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil ont des différents caractéristiques et propriétés. Ces protocoles sont divisés en deux parties : les protocoles MAC synchrones et asynchrones.

Nous décrivons brièvement quelques protocoles MAC et présentons leurs fonctionnements.

❖ **Protocole synchrone :**

- **T-MAC (Timeout MAC) :**

Dans T-MAC, chaque nœud se réveille périodiquement pour communiquer avec ses voisins. Les nœuds communiquent entre eux en utilisant un mécanisme de RTS/CTS qui permet d'éviter les collisions et le problème de station cachée. L'objectif de T-MAC est de pallier aux inconvénients soulevé avec S-MAC en rendant la période d'ordonnancement de frame variable, en fonction du niveau de trafic. Chaque nœud se réveille périodiquement, écoute le canal et reste éveillé durant une période, variable et déterminé dynamiquement, avant de retourner ensuite en mode sommeil (voir Figure 17).

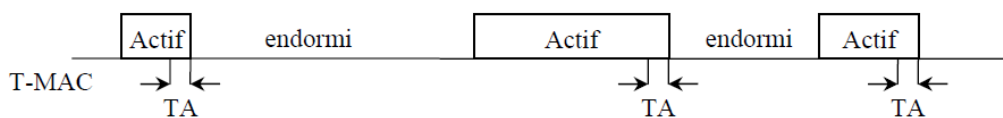


Figure 17 : Périodes d'écoute et de veille dans T-MAC

- ❖ **Protocole asynchrone :**

- **B-MAC (Berkeley MAC) :**

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 18).

Les nœuds sont en mode sommeil la plupart du temps et se réveillent à intervalles réguliers. A 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. B-MAC ne nécessite pas une synchronisation pour que les nœuds dorment et se réveillent en même temps.

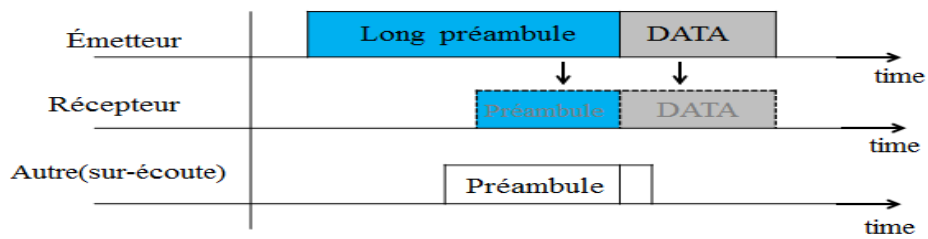


Figure 18 : Protocole B-MAC

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de bien définir les propriétés souhaitables dans un protocole MAC pour les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs). L'efficacité énergétique, la scalabilité et l'adaptabilité etc. Pour une meilleure compréhension des caractéristiques d'un protocole MAC, nous avons présenté un protocole SMAC (Sensor MAC) que nous souhaitons de le simuler et nous vise à réduire la consommation d'énergie en attaquant les sources de perte d'énergie. Nous avons également décrit les avantages et les inconvénients relatifs à ce protocole.

Introduction

La simulation de réseau de capteurs est un thème de recherche difficile et important. Beaucoup de compagnies et d'Universités y travaillent en utilisant des simulateurs réseaux différents qui répondent à des besoins bien spécifiques. Le développement d'un nouveau protocole MAC pour le réseau de capteur sans fil nécessite une phase de simulation avant leur implémentation réelle. Dans ce chapitre nous intéressons aux protocoles SMAC pour les RCSFs.

Notre travail consiste à simuler le protocole SMAC, en utilisant la plateforme Castalia-3.2 avec le simulateur OMNeT++, afin de démontrer la performance et l'efficacité de ce protocole en termes d'économie d'énergie

Ce chapitre est consacré à la partie pratique de notre travail. Il décrit la simulation de protocole S-MAC ainsi l'objectif et les résultats qu'on a obtenus.

On commence premièrement par la description des simulateurs choisis pour notre simulation *OMNeT++* avec l'utilisation de *CASTALIA* au cas particulier des réseaux de capteurs sans fil.

I. Présentation d'OMNeT++

OMNeT++ IDE (Integrated Development Environment) est basé sur la plate-forme Eclipse, c'est un environnement de simulation à événement discrets, Il a été accessible au public depuis 1997, développée par « Andras Varga », chercheur à l'université de Budapest. Utilisé pour la simulation des réseaux de communication et d'autres systèmes distribués, fonctionne sur Linux, Ubuntu et Windows. Basée sur le langage C++ ainsi grâce à son architecture modulaire, flexible et générique, il est totalement programmable, paramétrable et modulaire. [17] OMNeT++ a été utilisé avec succès et très largement répondu dans de divers domaines d'applications tel que :

- La modélisation des protocoles de communication,
- La modélisation des réseaux filaires et sans fil,
- La modélisation des systèmes répartis,
- En général, il peut être utilisé pour n'importe quel système à événements discrets pouvant être modélisé et simuler selon des entités communiquant par envoi de messages.



Figure 19 : Le lancement du simulateur OMNeT++

1. Description architectural d'OMNeT++

OMNeT++ est un simulateur à événement discret permettant la modélisation des systèmes sous forme de modules communiquant entre eux, notamment les réseaux de capteurs sans fil. Les modules communiquent entre eux via des messages à travers des ports (In, Out). La figure 20 schématise cette vue comme suit :

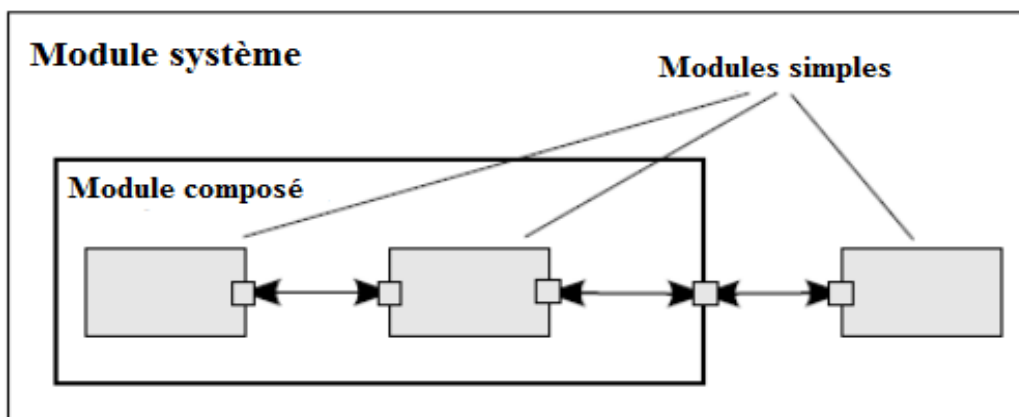


Figure 20 : Modélisation d'un réseau sous OMNeT++

Sous OMNeT++, un nœud capteur est modélisé sous forme d'un module simple. Le réseau de capteurs sans fil est alors défini comme un ensemble de modules simples. La figure 21 suivante présente l'interface de développement d'OMNeT++.

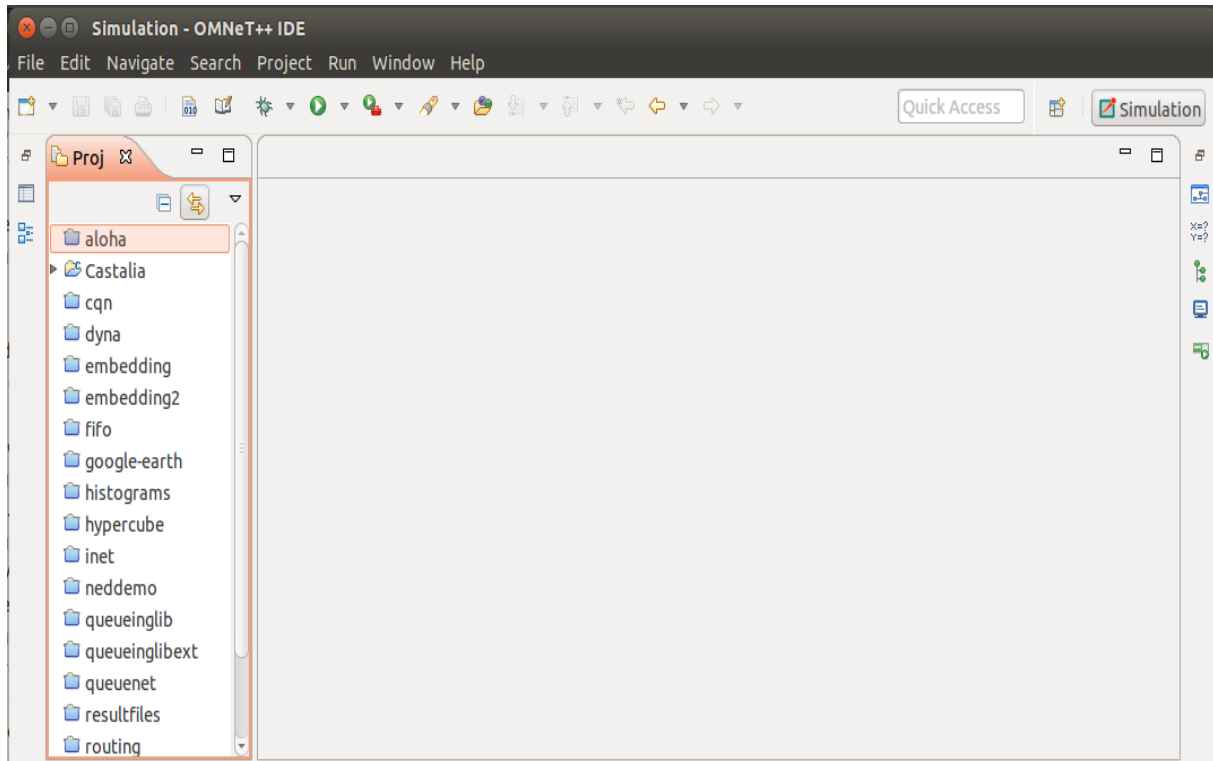


Figure 21 : Interface de développement du simulateur OMNeT++

2. Principaux fichiers d'OMNeT++

Les différents fichiers sont [17] :

- A. Fichier (.ned)** : Le fichier avec l'extension ".ned" est utilisé pour la description des nœuds formant le réseau.
- B. Fichier (.cc)** : Le fichier avec l'extension ".cc" sont utilisés pour programmer les comportements des nœuds suite à la réception d'un message.
- C. Fichier (.h)** : Les fichiers ayant l'extension ".h" contiennent les entêtes des méthodes utilisées dans les fichiers ".cc".
- D. Fichier (.msg)** : Les fichiers avec l'extension ".msg" indiquent les fichiers contenant les structures des messages. Ils seront transformés en fichiers ".c".
- E. Fichier (.ini)** : Le fichier avec l'extension ".ini" est utilisé pour contenir les conditions initiales pour les différents scénarios des simulations tel que d'initialisé les différents paramètres et modules, nom du réseau à exécuter ainsi la topologie de réseau.

Remarque : Le simulateur OMNeT++ n'est pas spécialisé pour les réseaux de capteurs sans fil, pour cela il existe plusieurs extensions, plate-forme et simulateurs basés sur OMNeT++ qui essaient d'introduire ce manque comme "Mobility FrameWork", "Mixim", "Castalia", etc.

- **Mobility FrameWork :** est la plate-forme préférée pour la simulation des réseaux Ad hoc, mobile etc.
- **Mixim :** simulateur pour la communication sans fil, fournit des modèles détaillé de canal sans fil (décoloration, etc.), la mobilité etc.
- **Castalia :** Dans notre travail on a utilisé le simulateur CASTALIA puisqu'il est l'un des meilleurs simulateurs pour les réseaux de capteurs sans fil.

II. L'application Castalia

Castalia est une plateforme de simulation pour les réseaux de capteurs sans fil basé sur OMNeT++, utilisée par des chercheurs et des développeurs qui veulent tester leurs algorithmes distribués et ou leurs protocoles dans de vrais modules de communication sans-fil. Castalia a été développé à NICTA21 (National ICT Australia) en 2006. En 2007, il est devenu publique en tant qu'un projet open source sous la licence publique académique.

Castalia offre la possibilité de manipuler différentes couches du modèle OSI du découpage des réseaux on peut définir des couches MAC, des couches réseaux (routage des paquets) et des couches application. [23]

Le simulateur Castalia représente une extension des fonctionnalités d'OMNeT++ notamment dans les phases de la transmission de paquets et la gestion de l'énergie [18]. Dans OMNeT++ le paquet est transmis via le canal de communication (canal sans fil "Wireless Channel") comme indiqué dans la figure 22.

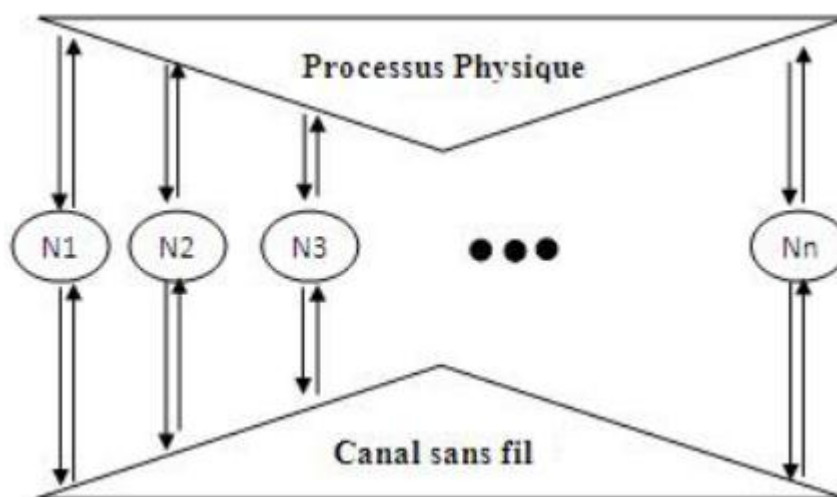


Figure 22 : Les Nœuds et leurs connexions en Castalia

La figure 23 explique brièvement le fonctionnement d’une application Castalia. On trouve les modules de communication à savoir ”Routing” et ”MAC” présentés ci-dessus et le module ”Radio” qui simule le moyen de transport physique de l’information (”l’air” dans notre cas puisqu’il s’agit de réseaux sans fil). Ensuite vient la couche ”Application” et le gestionnaire de capteurs qui vont définir et gérer ou sont placés les capteurs, qu’elles sont leurs caractéristiques techniques comme leur énergie, leur portée d’émission, etc. [18]

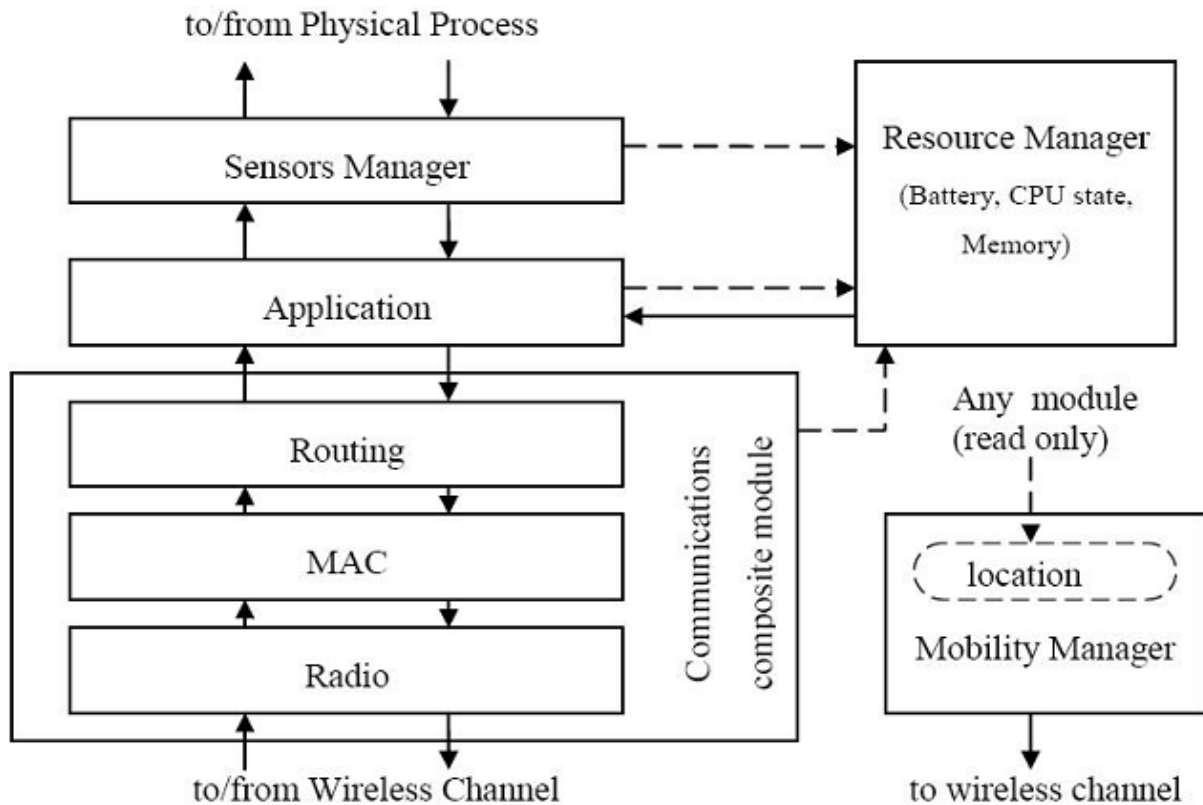


Figure 23 : La vue d’un nœud sous Castalia

Lors de l’installation de Castalia, chaque module sera représenté par un répertoire.

Les principaux répertoires de Castalia sont: Le répertoire MAC : dans ce répertoire on a ajouté notre nouveau protocole SMAC, le répertoire de simulations, le Radio, Ressource Manager, Wireless Channel, Routing, etc.



Figure 24 : Les répertoires de base de Castalia

III. Mise en œuvre de l'environnement de travail

Notre simulation a été réalisée dans l'environnement logiciel suivant :

- Machine Virtuelle : VMware Workstation 10.
- Système d'exploitation : Ubuntu 14.04.
- Le simulateur OMNeT++ 4.6 (dernière version 2014) ;
- Le Simulateur Castalia 3.2.

1. Mise en place de l'environnement de travail

1.2. La couche MAC

Pour développer un nouveau protocole MAC on a deux solutions soit modifier un des protocoles déjà existants soit on développe entièrement un nouveau. La mise en place d'un nouveau module dans Castalia 3.2 est débutée par la création d'un nouveau dossier (dans notre cas le dossier est nommé (SMAC) au sein de la hiérarchie de fichiers sources de Castalia. L'emplacement est différent selon le module que l'on souhaite développer. Pour nous il faut placer ce dossier à l'emplacement suivant :

Castalia/src/node/communication/mac

Les étapes de la mise en place du module SMAC sont comme suit :

– On commence par la création d'une interface du module, elle est définie par un fichier .ned qui possède une syntaxe du même nom. Vient ensuite la définition du module en lui-même. Celle-ci comporte une partie de déclaration des paramètres dynamiques du module, puis une partie qui concerne ses entrées/sorties.

– Maintenant on passe à la création des fichiers sources, les fichiers de l'implémentation des modules SMAC.cc et SMAC.h doivent avoir le même nom que le nom du module dans l'interface NED. Ensuite ajouter les fichiers sources suivants : SMacPacket.msg, SMacPacket_m.cc, SMacPacket_m.h et on initialise dans « omnetpp.ini » qui a l'emplacement suivant: 'Simulations/BANTest' les différents paramètres et modules, le nom du réseau à exécuter ainsi la topologie de réseau (les différents scénarios des simulations).

1. Réalisation

1.1. Objectif

- ❖ Notre objectif est d'ajouter et de simuler un nouveau protocole MAC au niveau de la plateforme Castalia.
- ❖ démonstration des performances de protocole SMAC en terme d'économie d'énergie.
- ❖ La comparaison entre le protocole SMAC par rapport aux deux périodes (veille, écoute) et écoute seulement.

2. Description détaillé

a. Description de la conception d'un nœud

Pour notre simulation on a utilisé le module nœud définie dans Castalia. Pour une vue mieux explicatif le fichier graphique .NED illustre les différent modules utilisés (voir figure 25). [17]

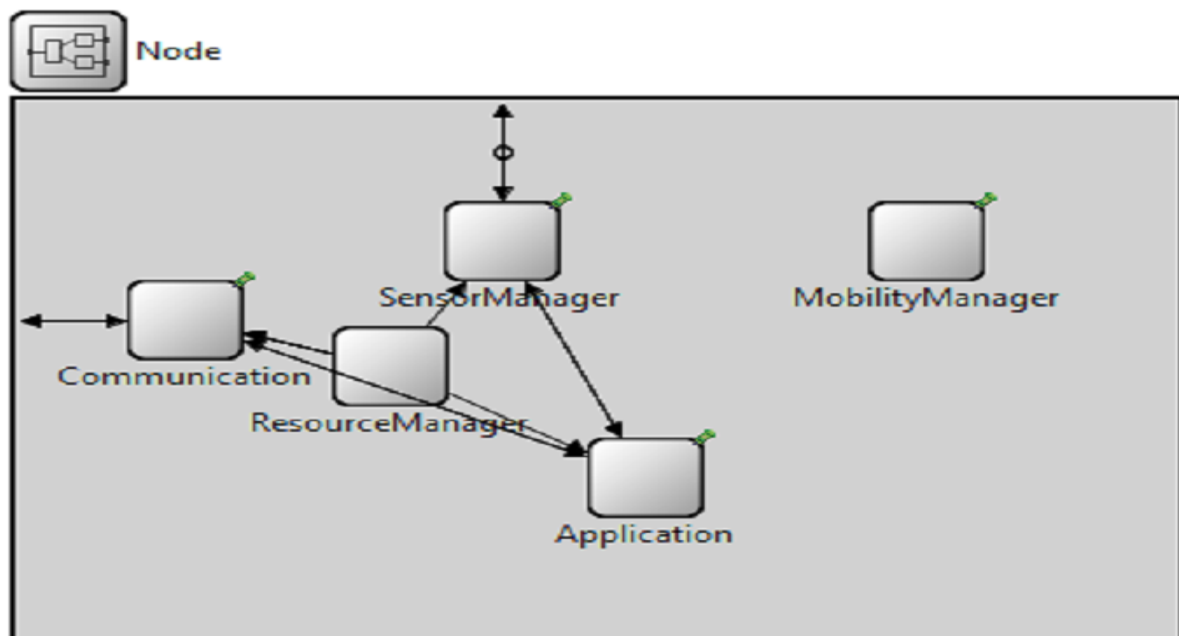


Figure 25 : Le fichier SMAC.Ned en mode graphique.

b. Description du réseau

La structure du réseau est défini dans le fichier " SensorNetwork.ned " (voir figure 26). Le réseau est composé du module nœud décrit précédemment ainsi d'un canal sans fil pour la communication entre les nœuds et d'un processus physique pour la gestion des données capturées. La connexion entre les nœuds est géré au niveau de cette structure dans « connections ». Pour se rapprocher aux concepts des réseaux de capteur sans fil on a choisi la génération aléatoire.

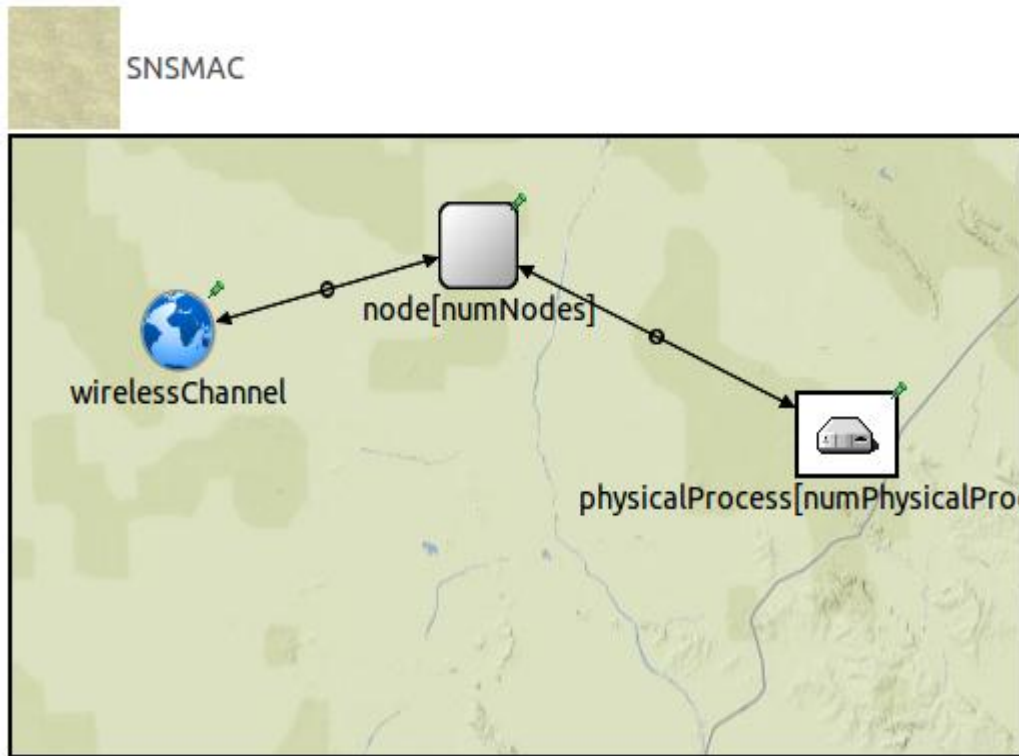


Figure 26 : Le fichier SensorNetwork.ned.

c. Paramètres de simulation

La surface de déploiement et la durée de simulation se varie selon le nombre des nœuds. Le détail des paramètres de simulation est présenté dans le tableau suivant :

	S MAC
Temps d'écoute	61 ms
Taille de paquet d'Ack	11bytes
Taille de paquet de SYNC	11bytes
Taille des paquets de CTS / RTS	13bytes
Temps de trame	610 ms
Temps de simulation	100 s
Temps de synchronisation	6 ms
Champ (domaine)	Varié selon le nombre de nœuds
Puissance de transmission	-15dBm
Application	Throughput
Fichier des paramètres Radio	BANRadio
Energie initiale	18720 Joule

Tableau 3 : Les paramètres utilisés pour la simulation de protocole SMAC

3. Résultats et analyses de simulation de protocole S-MAC

À la fin de l'exécution la génération de deux fichiers se créer.

1- Fichier trace : donne une vue générale et détaillé du processus parcouru par chaque nœud durant la simulation.

2- Fichier résultat : affiche un résumé sur les informations collectées à la fin de l'exécution comme le nombre de paquets reçus, les paquets perdus, et la consommation d'énergie. Par la suite, on montre ces résultats sous forme des graphes.

```
Castalia| what:SMAC-6 (1)
Castalia| when:2015-06-05 08:06
Castalia| label:SMAC-6
Castalia|   module:SN.wirelessChannel
Castalia|     histogram name:Fade depth distribution
Castalia|     histogram min:-50 histogram max:15
Castalia|     histogram values 29 39 48 245 393 1045 2504 5578 10657 15091 13479 3784 193 0
Castalia|   module:SN.node[0].ResourceManager
Castalia|     simple output name:Consumed Energy
Castalia|     0.0502174
Castalia|   module:SN.node[0].Communication.Radio
Castalia|     simple output name:RX pkt breakdown
Castalia|     33 Failed with interference
Castalia|     134 Failed, below sensitivity
Castalia|     49 Failed, non RX state
Castalia|     14 Received despite interference
Castalia|     4316 Received with NO interference
Castalia|     simple output name:TXed pkts
Castalia|     4286 TX pkts
Castalia|   module:SN.node[0].Communication.MAC
Castalia|     simple output name:Sent packets breakdown
Castalia|     2038 ACK
Castalia|     2233 CTS
Castalia|     15 SYNC
Castalia|   module:SN.node[1].ResourceManager
Castalia|     simple output name:Consumed Energy
Castalia|     0.0282027
Castalia|   module:SN.node[1].Communication.Radio
Castalia|     simple output name:RX pkt breakdown
Castalia|     10 Failed with interference
Castalia|     87 Failed, below sensitivity
```

Figure 27 : Fichier résultat.txt du Castalia

Explication :

La simulation est établie sur un champ de 100mx100m avec un nombre de 6 nœuds déployés d'une manière uniforme. Les résultats de la simulation sont enregistrés dans le fichier résultat sous Castalia.

Six nœuds déployés d'une manière uniforme sont suffisantes pour couvrir l'overhearing, l'idle listening, les collisions et la synchronisation. Les résultats obtenus pour le protocole SMAC sont présentés graphiquement dans les figures ci-dessus :

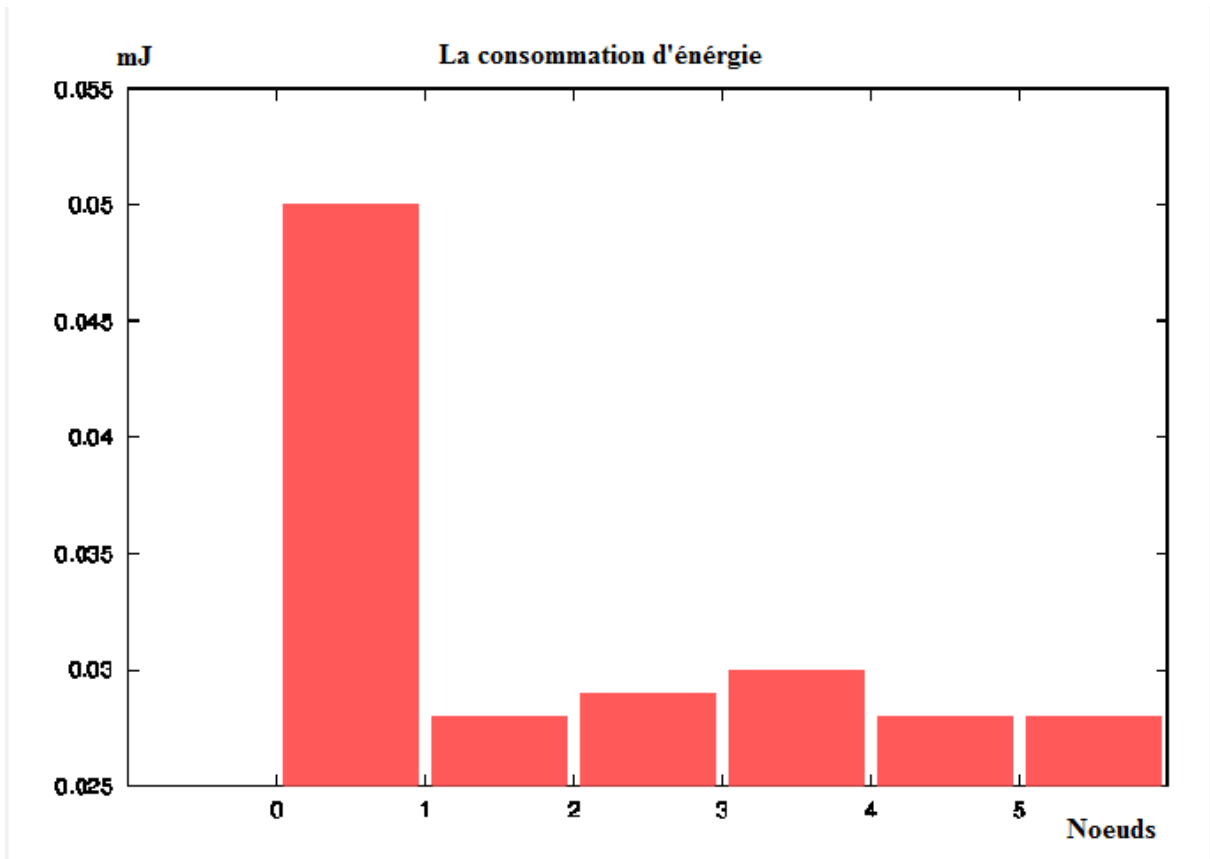


Figure 28 : L'énergie consommée par chaque nœud

La figure 28 montre la quantité d'énergie consommée par chaque nœud. Le SMAC avec sommeil périodique et l'évitement d'overhearing a donné des bons résultats en matière de la consommation d'énergie. Ces résultats montrent une meilleure efficacité énergétique du protocole S-Mac.

Le détail des paquets envoyés par type, et les paquets reçus est illustré dans les figures : (29,30) respectivement. Les figures 33, 34 montrent que le SMAC a réduit considérablement le nombre des paquets reçus et transmis à cause de sommeil périodique parce que les nœuds se communiquent seulement dans une partie du frame (la période d'écoute), ce qui réduit le débit et augmente la latence.

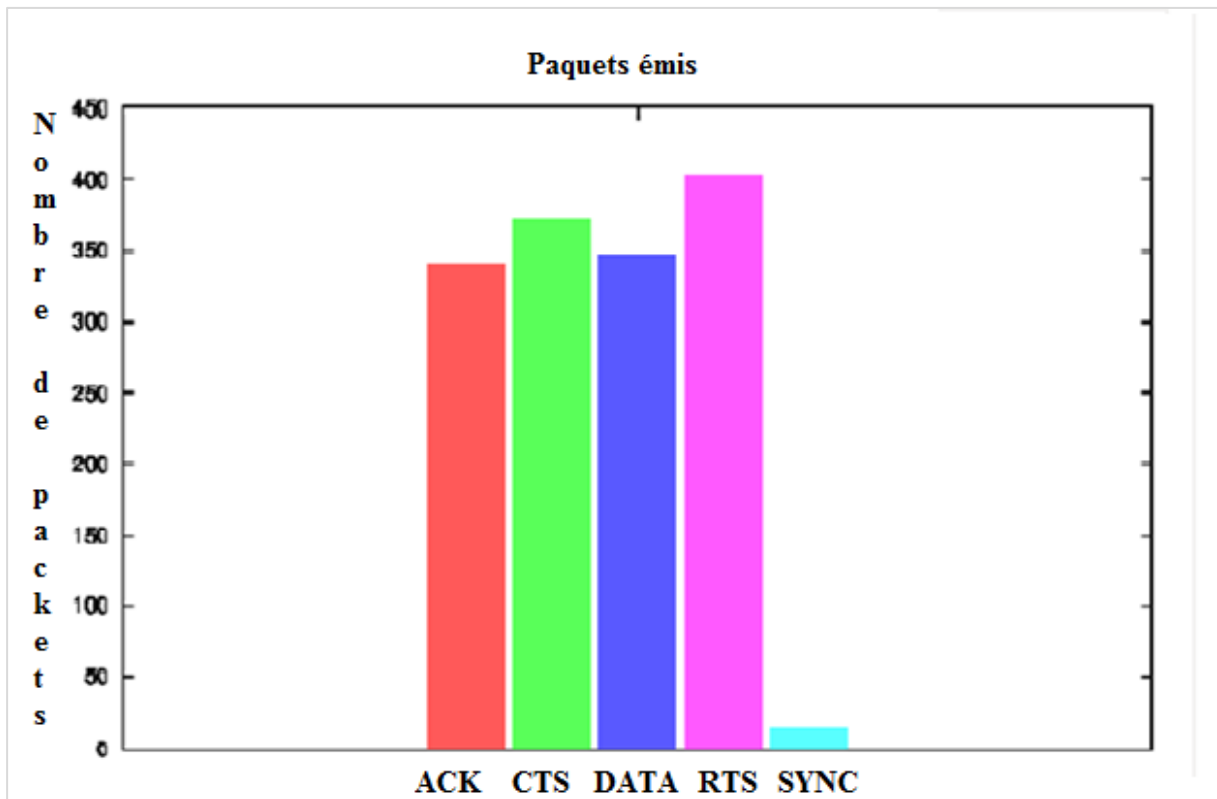


Figure 29 : Nombre de paquets transmis

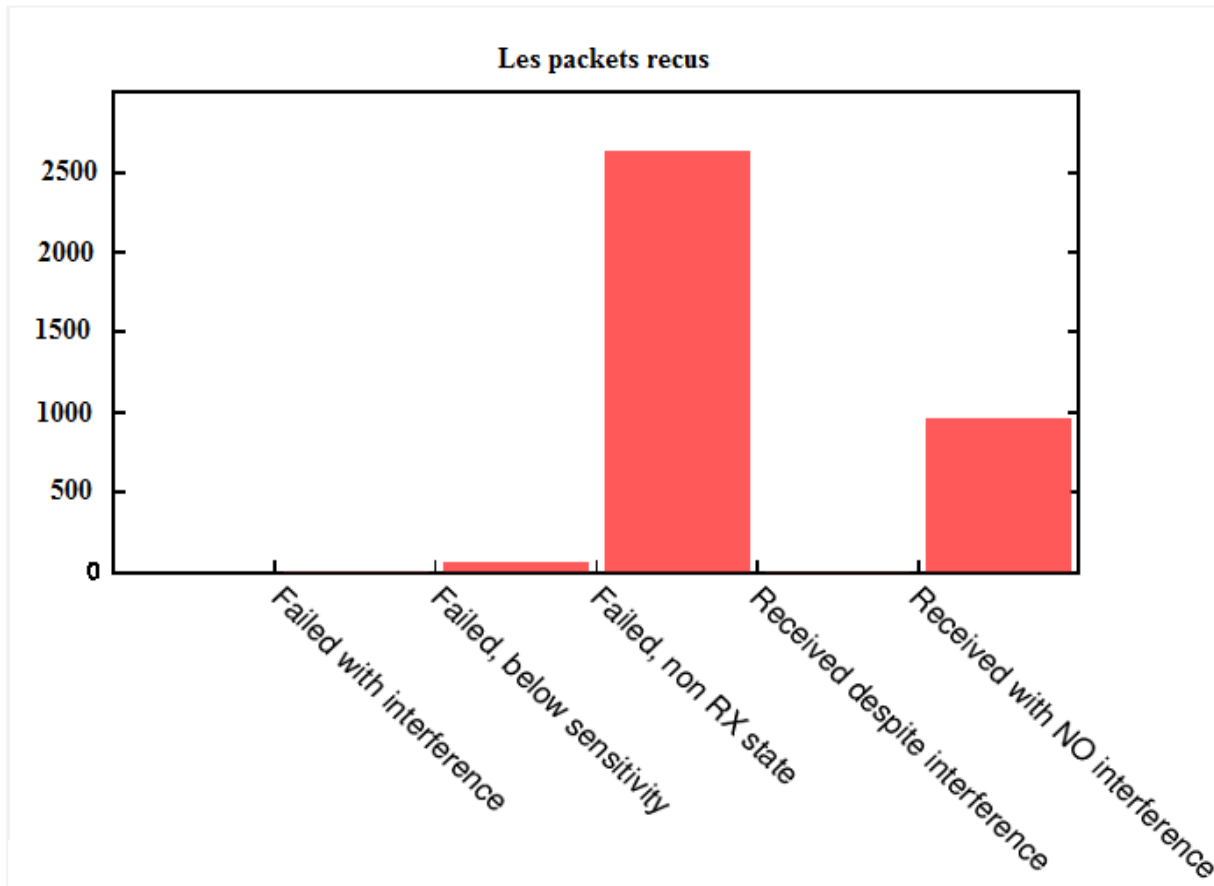


Figure 30 : détail des paquets reçus

1. Échec avec l'interférence
2. Échec dessous de la sensibilité
3. Échec, Etat non RX
4. Reçu malgré l'interférence
5. Reçu sans interférence.

❖ **Comparaison :**

Les deux graphes représentés dans les figures : 31, 32 montrent que le SMAC avec l'échange périodique (écoute/veille) a donné des bons résultats en matière de la consommation d'énergie, et que la consommation d'énergie dans le cas où on augmente la durée de l'écoute sans évitement d'overhearing est plus élevée que dans le SMAC.

On conclut que les nœuds perdent de l'énergie pendant l'écoute de la radio en vide. La quantité d'énergie consommée en mode d'écoute de la porteuse à vide est presque aussi grande que celle du mode réception. En effet, On peut clairement observer l'efficacité des mécanismes d'évitement d'overhearing et de veille périodique utilisés par le protocole SMAC.

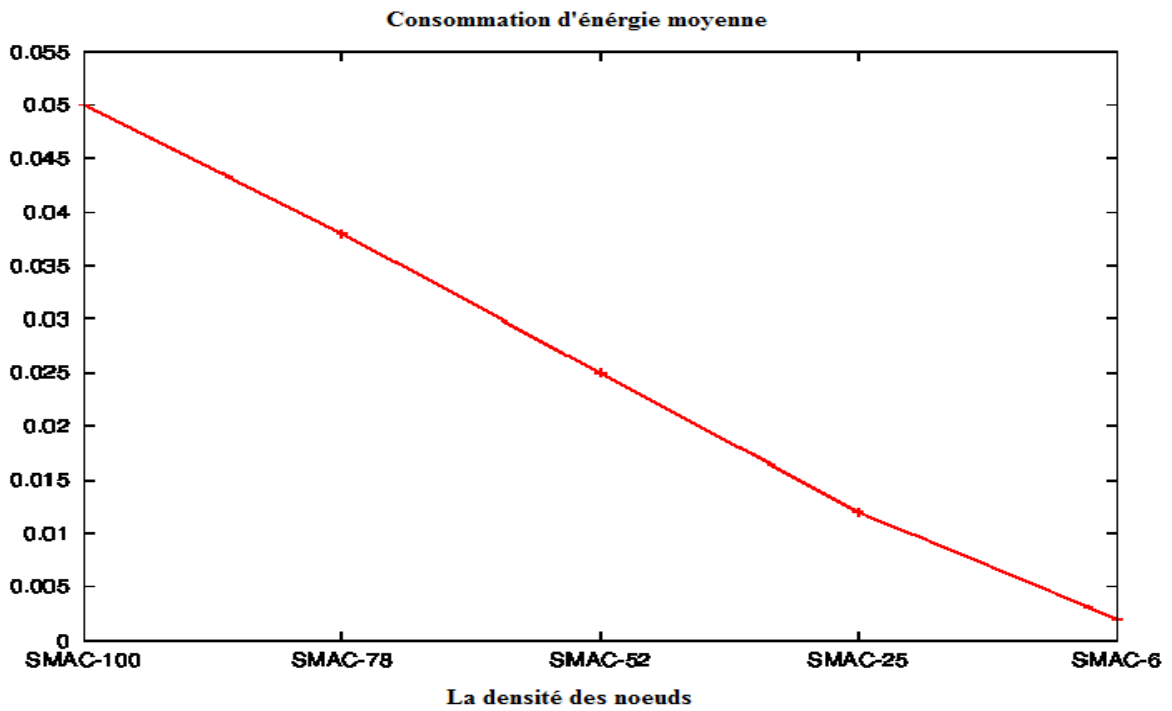


Figure 31 : L'énergie moyenne consommée par plusieurs simulations en mode (écoute/veille)

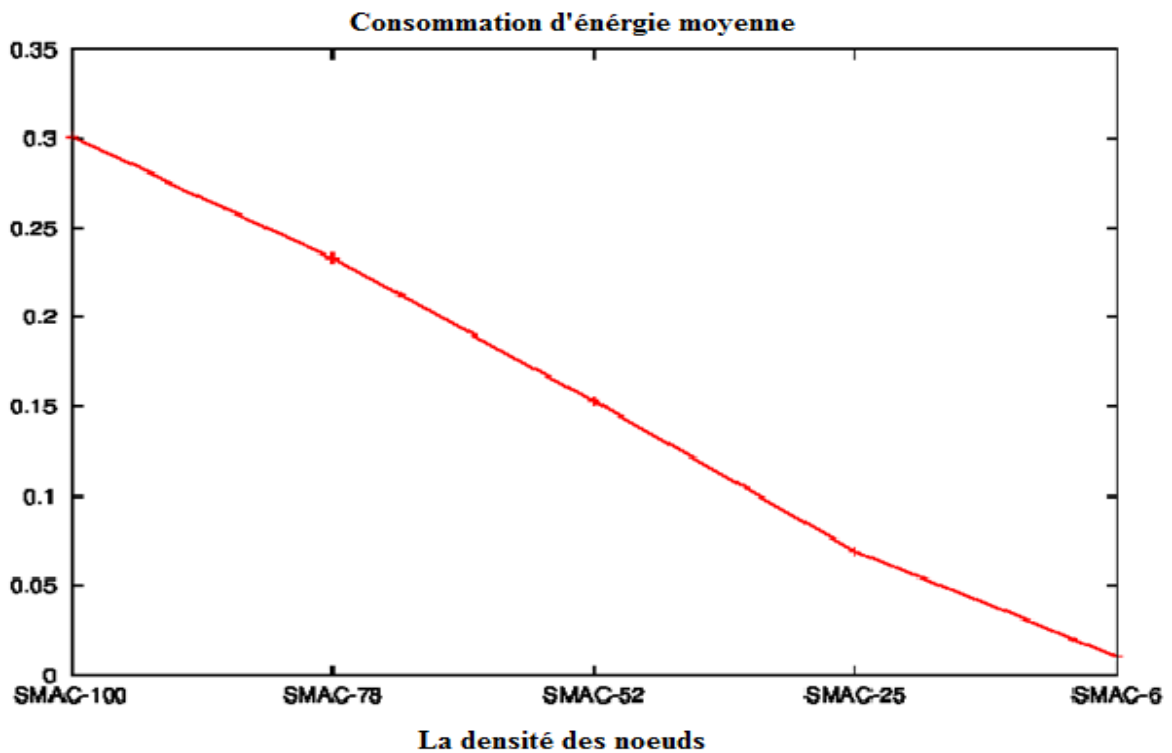


Figure 32 : L'énergie moyenne consommée par plusieurs simulations en mode écoute

Nous pouvons remarquer que l'énergie moyenne consommée dans plusieurs simulations sans en mode veille c.à.d. on augmente la période d'écoute est plus grande par rapport à ce que n'a obtenu dans la figure (34). On conclut que les nœuds perdent de l'énergie pendant l'écoute de la radio en vide. La quantité d'énergie consommée en mode d'écoute de la porteuse à vide est presque aussi grande que celle du mode réception. En effet, On peut clairement observer l'efficacité du protocole SMAC et son principe de deux périodes (écoute et veille).

Conclusion

Le protocole S-MAC fonctionne mieux dans des conditions de faible charge avec une efficacité énergétique plus élevée. D'après ce que nous avons vu, le SMAC est un protocole performant parce que les principaux critères de performances dans les réseaux de capteurs sans fil est la consommation d'énergie et la durée de vie du réseau.

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à 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 applications. Nous avons discuté également La couche 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),

Nous choisissons dans notre travail, le protocole SMAC qui doit être utilisé efficacement la contrainte d'énergie dans les réseaux de capteurs. En fait, la tâche du protocole SMAC 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 collisions, l'écoute à un canal libre, l'overhearing, l'overhead et les fréquentes transitions entre les modes "en veille" et "activité".

Les résultats de notre simulation de protocole SMAC sont satisfaisants suite à l'utilisation du nouveau Simulateur OMNeT++ avec la plateforme "Castalia" qui est plus dédiée au Réseaux de Capteurs. Ce dernier se base sur le principe des modules. D'après nos différents tests effectués, nous avons remarqué la diminution d'énergie consommé auprès des nœuds ce qui donne une longévité du réseau.

Bibliographie

- [1] : N. BADACHE et T. LEMLOUMA « Le Routage dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc » 2008/2009, pages 7-9
- [2] : S. KABOU et A. BELGOURARI « Etat de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil. »2009/2010, pages 13-23
- [3]: M. RAMDANI « PROBLÈMES DE SÉCURITÉ DANS LES RÉSEAUX DE CAPTEURS AVEC PRISE EN CHARGE DE L'ÉNERGIE » Novembre 2013, page 17-18
- [4] : M. BENMOHAMED et Z. SAHNOUN « Routage dans les réseaux mobiles ad hoc Par une approche à base d'agents »25 / 06 / 2008, Pages
- [5] : A. BOUZAHER « Approche agent mobile pour l'adaptation des Réseaux mobiles ad hoc »année 2013, Pages17-20
- [6] : M. SAYAD « Energy Efficient Protocol (EEP) : un protocole de routage efficace en énergie pour réseaux de capteurs sans fil »2008/2009, Pages 14-25
- [7] : M. OULARBI et S. KASSAB « Elaboration d'un protocole de routage efficace en énergie pour réseaux de capteurs sans fil »2009 / 2010, Pages 21-28
- [8] : S. AKHENAK et R. ZEMOURI « Une architecture prédictible distribuée pour la gestion de l'énergie dans un réseau de capteurs sans fil »2012 /2013, Pages 26-30
- [9] : D. BOUBICHE « Une approche Inter-Couches (cross-layer) pour la Sécurité dans les R.C.S.F » Pages 40-66
- [10] : O. MOUSSAOUI « Routage hiérarchique basé sur le clustering : garantie le QOS pour les applications multicast et réseaux de capteurs » 11/12/2006, Pages 15-24
- [11] : Z. BOUZIDI, A. BENAMEUR « Mise en place d'un réseau de capteurs sans fil pour l'irrigation intelligente » 2011-2012, Pages 15-22
- [12] : J. Haapola, Z. Shelby, C. Pomalaza-Raez, P. Mahonen, « Cross-layer energy analysis of multi-hop wireless sensor networks ». Proceeding of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN'05), Istanbul, Turkey, January 31 - February 2, 2005. Pages 33 - 44.
- [13] : M.SALVADOR, D. GINHAC « Conception d'un micro-capteur d'image CMOS à faible consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil » 28/01/2014, Pages28-29
- [14] : HUNG-CUONG LE « Optimisation d'accès au médium et stockage de données distribuées dans les réseaux de capteurs» Pages23-45

- [15] : M. MOUAD, N. BOUABDELLAH « Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil » 2007-2008, Pages 6-23
- [16] : M. TERRÉ « Le Standard 802.11 Couche physique et couche MAC » Mars 2007, Pages 20-30
- [17] : L. NIAR « Analyse graphique pour la surveillance dans un réseau de capteurs sans fil » juillet 2012, Pages 90-120
- [18] : L. DOSSANTOS et C. LALANNE « Implémentation d'une couche MAC (accès au support) dans OMNET++ / Castalia pour des Réseaux de capteurs pour la surveillance ». 6 mai 2011 Pages 4-8
- [21] : W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. « An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks ». June 2002. Pages 1567-1576
- [22] : K. Obraczka, V. Rajendran, and J.J. G. L. « Aceves. Energy Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks. In the 1st international conference on embedded networked sensor systems (SenSys '03) », Pages 181-192, Nov 2003.
- [23] : I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagöz. « MAC Protocols for Wireless Sensor Networks : a Survey ». IEEE Communications Magazine, Pages 115-121, April 2006.
- [24] : K. Langendoen and G. Halkes. « Embedded Systems Handbook, chapter 34: Energy-Efficient Medium Access Control ». CRC press, <http://www.st.ewi.tudelft.nl/~koen/papers/MAC-chapter.pdf>, 2005.
- [25] : Jacques BAHY, Ahmed MOSTEFAOUI « Réseaux de capteurs: localisation, couverture et fusion de données ». 14 novembre 2008 Pages 13-20
- [26] : Zhi-Wen Ouyang, Shruthi B Krishnan, Sang Soo Kim. « Medium Access Control for Wireless Sensor Networks »; CS258 - Advanced Communication Networks, San Jose State University; Spring 2005.

Webographie

- [16] : <http://nettoyersonordinateur.blogspot.com/2012/11/avantages-et-inconvenients-des.html>
- [17] : www.infopourtous.site88.net/Cours/3SI/SERI/CHP4.pps
- [19] : http://www2.ulg.ac.be/telecom/teaching/notes/multimedia/node63_mn.html
- [20] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_liaison_de_donn%C3%A9es