



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

**UNIVERSITE IBN KHALDOUN - TIARET**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTÉ MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE  
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER**

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par :

**KOUACHI BOCHRA**

**LARBI KAMILIA**

Sur le thème

---

## **Étude comparative entre deux protocoles MAC asynchrones dans les réseaux de captures sans fil**

---

Soutenu publiquement le **29/06/2022** à Tiaret devant le jury composé de :

Mr. NASSANE Samir

Mr. BENGHENI Abdelmalek

Mr BOUALEM Adda

M.A.A Université IBN-KHALDOUN Tiaret

M.C.B Université IBN-KHALDOUN Tiaret

M.C.B Université IBN-KHALDOUN Tiaret

Président

Encadreur

Examineur

**2021 - 2022**

**«Les batailles de la vie ne sont pas gagnées par les plus forts ni par les plus rapides, mais par ceux qui n'abandonnent jamais»**

*El Hassan ben Mohammed el Alaoui*

# *Remerciements*

En premier lieu, nous rendons grâce à DIEU des bienfaits qu'il nous ont accordé durant toute notre vie, de nous avoir permis de faire ce projet et de nous avoir donné la force, le courage et la patience d'achever ce travail.

Un très grand merci à :

- Nos parents qui nous ont suivis pendant nos études.
- Nous remercions Monsieur, BENGHENI Abdelmalek d'avoir accepté d'être notre encadreur et d'avoir dirigé ce travail durant toute l'année avec beaucoup d'efforts et de patience.
- Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury Monsieur NASSANE Samir et Monsieur BOUALEM Adda qui ont pris de leur temps pour juger ce modeste travail, qu'ils trouvent ici l'expression de notre gratitude et tout notre respect.
- Nous adressons aussi nos remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseignés durant ce cursus universitaire.

Et pour finir, nous tenons à remercier tous nos amies qui nous ont apporté leur soutien moral pendant cette année d'études.

Nous remercions sincèrement tout le monde

# Dédicaces

Je dédie cet humble travail à :

- Mon père qui a été toujours à mes côtés, que Dieu tout puissant les garde pour moi et à ma Mère qui ne cesse jamais de m'encourager.
- Ma soeur, mes frères et leurs familles pour leur amour et leur soutien.
- Mes neveux : Adam, Yasmine et le petit Iyed.
- Toute ma famille et mes amies pour leur soutien tout au long de mes années d'études.
- Mon binôme Kamilia pour son soutien moral et sa patience et compréhension à mes côtés tout au long de ce projet.

***KOUACHI BOCHRA***

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leurs prières tout au long de mes études.
- À mes chères sœurs et à mon frère pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.
- À mes chères amis qui m'ont soutenu et aidé à réaliser ce travail.
- À Pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet. Et pour ceux qui apprécient la science et cherchent à la développer.
- À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

**LARBI KAMILIA**

**Résumé :**

Dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), 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 écoute au canal, ce dernier consommant beaucoup d'énergie. Mais, ils n'évitent pas les fréquentes transitions entre les modes "en veille" et "activité" alors qu'ils consomment aussi de l'énergie. De ce fait, l'objectif de ce travail est de faire une étude comparative entre deux protocoles MAC asynchrones utilisés dans les RCSF en évaluant les performances d'un RCSF expérimental à l'aide du simulateur Contiki2.7 OS/COOJA et par l'utilisation de deux types de protocoles MAC asynchrones différents ; le premier utilise la transmission de trame de préambule telle que X-MAC et l'autre type est basé sur le paradigme de balisage qui utilise la transmission de trame de balise comme RI-MAC.

**Mots clés :** Conservation d'énergie, Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), MAC (Medium Access Control), Contiki2.7 OS, COOJA.

**Abstract:**

In wireless sensor networks (WSNs), energy conservation is an important issue. Several works focus on energy conservation in communication by designing medium access control (MAC) protocols specifically for these networks. The principle used in most of this work is to allow the sensor nodes to go to sleep instead of remaining in channel listening mode, the latter consuming a lot of energy. But, they do not avoid the frequent transitions between "sleep" and "activity" modes while they also consume energy. Therefore, the objective of this work is to make a comparative study between two asynchronous MAC protocols used in RCSFs by evaluating the performance of an experimental RCSF using the Contiki2.7 OS/COOJA simulator and by the use of two different types of asynchronous MAC protocols; the first uses preamble frame transmission such as X-MAC and the other type is based on beacon paradigm which uses beacon frame transmission as RI-MAC.

**Key words:** Energy conservation, Wireless sensor networks (RCSF), MAC (Medium Access Control), Contiki2.7 OS, COOJA.

## الملخص:

في شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSNs)، يعد الحفاظ على الطاقة قضية مهمة. تركز العديد من الأعمال على الحفاظ على الطاقة في الاتصالات من خلال تصميم بروتوكولات التحكم في الوصول إلى الوسائط (MAC) خاصة لهذه الشبكات. المبدأ المستخدم في معظم هذا العمل هو السماح لعقد المستشعر بالنوم بدلاً من البقاء في وضع الاستماع للقناة، حيث يستهلك الأخير الكثير من الطاقة. لكنهم لا يتجنبون التحولات المتكررة بين وضعي "النوم" و "النشاط" بينما يستهلكون أيضاً الطاقة. لذلك، الهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة مقارنة بين بروتوكولي MAC غير متزامنين مستخدمين في RCSF من خلال تقييم أداء RCSF التجريبي باستخدام محاكي Contiki2.7 OS / COOJA وباستخدام نوعين مختلفين من بروتوكولات MAC غير المتزامنة؛ يستخدم الأول إرسال إطار التمهيد مثل X-MAC والنوع الآخر يعتمد على نموذج المنارة الذي يستخدم إرسال إطار المنارة مثل RI-MAC.

**الكلمات المفتاحية:** الحفاظ على الطاقة ، شبكات الاستشعار اللاسلكية (RCSF)، التحكم في الوصول المتوسط (MAC)، Contiki2.7 OS ، COOJA.

# Sommaire

<b>Introduction général .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil</b>	
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Architecture d'un nœud de capteur .....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 La pile protocolaire dans un RCSF .....</b>	<b>5</b>
I.3.1 La couche physique .....	5
I.3.2 La couche liaison de données .....	6
I.3.3 La couche réseau.....	6
I.3.3 La couche transport .....	7
I.3.5 La couche application .....	7
I.3.6 Plan de gestion de l'énergie.....	7
I.3.7 Plan de gestion de mobilité.....	7
I.3.8 Plan de gestion des tâches .....	8
<b>I.4 Les réseaux de capteurs sans fil .....</b>	<b>8</b>
I.4.1 Architecture d'un RCSF .....	8
I.4.2 Les obligations des applications de RCSF .....	9
1- Le passage à l'échelle (scalabilité) .....	9
2- L'efficacité énergétique .....	9
3- L'équité .....	10
4- Auto organisation.....	10
5- Le débit .....	10
6- La latence.....	11
I.4.3 Domaines d'application des RCSF .....	11
1- Applications militaires.....	12
2- Applications environnementales.....	12
3- Applications médicales.....	13
4- Applications commerciales.....	13
I.4.4 Modèle de communication dans les RCSF.....	13
I.4.5 La consommation d'énergie dans les RCSF.....	14
1- La consommation d'énergie d'un nœud capteur .....	15
2- Les sources des pertes d'énergie .....	16

<b>I.5 Conclusion.....</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF</b>	
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2 La sous couche MAC.....</b>	<b>18</b>
<b>II.3 L'accès MAC.....</b>	<b>19</b>
II.3.1 Le protocole CSMA/CA.....	19
II.3.2 Le protocole DCF (Distributed Coordination Function).....	19
II.3.3 L'Algorithme de backoff.....	19
II.3.4 Le mécanisme de CCA (Clear Channel Assessment) .....	19
II.3.5 Terminal caché et terminal exposé.....	20
<b>II.4 La technique de cycle d'activité (Duty-cycle) .....</b>	<b>21</b>
<b>II.5 Les protocoles MAC pour les RCSF .....</b>	<b>21</b>
II.5.1 Les protocoles MAC synchrones .....	21
1- Le protocole S-MAC .....	22
2- Le protocole T-MAC .....	23
3- Le protocole D-MAC.....	23
II.5.2 Les protocoles MAC asynchrones.....	23
1- Les protocoles MAC de préambules .....	24
2- Les protocoles MAC de balisages .....	25
II.5.3 D'autres protocoles MAC .....	26
1- Les protocoles MAC Hybrides .....	26
<b>II.6 La comparaison de différents protocoles MAC pour RCSF .....</b>	<b>28</b>
<b>II.7 Conclusion .....</b>	<b>29</b>
<b>Chapitre III : La description du protocole MAC asynchrones simulés</b>	
<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>31</b>
<b>III.2 objectifs .....</b>	<b>31</b>
<b>III.3 Le protocole X-MAC pour RCSF.....</b>	<b>31</b>
III.3.1 Présentation du protocole X-MAC .....	31
III.3.2 Fonctionnement du protocole X-MAC .....	32
III.3.3 Les paquets de contrôle.....	32
1- La structure du paquet « Préambule » .....	32
2- La structure du paquet « ACK : ACKnowledgment » .....	33
III.3.4 Le traitement de la collision et la retransmission.....	34

III.3.5 Fonctionnement du protocole X-MAC .....	34
<b>III.4 Le protocole RI-MAC pour RCSF .....</b>	<b>36</b>
III.4.1 Présentation du protocole RI-MAC .....	36
III.4.2 Intérêt de protocole RI-MAC .....	37
III.4.3 Les paquets de contrôle .....	38
1- La structure du paquet « Beacon » .....	38
2- Le double rôle du paquet « Beacon » .....	39
III.4.4 Le traitement de la collision et la retransmission.....	39
III.4.5 Fonctionnement du protocole RI-MAC .....	40
<b>III.5 Conclusion .....</b>	<b>42</b>
<b>Chapitre IV : Simulation et comparaison</b>	
<b>IV.1 Introduction .....</b>	<b>44</b>
<b>IV.2 Aperçu sur le système d'exploitation Contiki.....</b>	<b>44</b>
<b>IV.3 Environnement de simulation Cooja.....</b>	<b>45</b>
<b>IV.4 Les métriques d'évaluation .....</b>	<b>52</b>
IV.4.1 La consommation moyenne d'énergie.....	52
IV.4.2 Latence moyenne des paquets .....	52
IV.4.3 Taux de livraison des paquets.....	52
<b>IV.5 Les paramètres de simulation .....</b>	<b>52</b>
IV.5.1 Le type de réseau utilisé et leur topologie .....	52
IV.5.2 Les valeurs des paramètres de simulation .....	53
<b>IV.6 L'évaluation des performances (comparaison) .....</b>	<b>54</b>
<b>IV.7 Conclusion.....</b>	<b>56</b>
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>57</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>59</b>

# Liste Des Figures

<b>Figure-I.1-</b> Anatomie d'un nœud capteur .....	3
<b>Figure-I.2-</b> Architecture d'un nœud de capteur .....	4
<b>Figure -I.3-</b> La pile protocolaire dans les RCSF.....	5
<b>Figure -I.4-</b> Le rôle de la couche liaison de données.....	6
<b>Figure -I.5-</b> Schéma général d'un RCSF.....	8
<b>Figure –I.6-</b> Architecture d'un RCSF.....	9
<b>Figure –I.7-</b> Applications des RCSF.....	12
<b>Figure -I.8-</b> La communication mono-saut et multi-saut dans les RCSF .....	14
<b>Figure-I.9-</b> La sur-écoute dans une transmission.....	16
<b>Figure -II.1-</b> La sous couche MAC dans le modèle OSI.....	18
<b>Figure -II.2-</b> Un scénario de cas de terminal caché.....	20
<b>Figure -II.3-</b> L'état des appareils publiés .....	21
<b>Figure -II.4-</b> Le Duty-cycle adaptatif de TMAC.....	23
<b>Figure –II.5-</b> Protocole Z-MAC (ZebraMAC) .....	27
<b>Figure -II.6-</b> Gestion du goulot d'étranglement dans Funelling-MAC .....	28
<b>Figure –II.7-</b> Exemple de super-trame du protocole Funelling MAC.....	28
<b>Figure –III.1-</b> Fonctionnement du protocole X-MAC.....	32
<b>Figure -III.2-</b> La structure du paquet de préambule .....	33
<b>Figure –III.3-</b> La structure de la trame de contrôle ACK.....	34
<b>Figure -III.4-</b> Machine a état finis du fonctionnement du protocole XMAC.....	35
<b>Figure -III.5-</b> Initiation de communication par le récepteur à l'aide de l'envoi de Beacon dans RI-MAC.....	36
<b>Figure -III.6-</b> Initiation de communication par l'émetteur à l'aide de l'envoi de Beacon on-request dans RI-MAC .....	37
<b>Figure -III.7-</b> Transmission de trames de données par des expéditeurs en concurrence dans RI-MAC.....	37
<b>Figure -III.8-</b> Le format d'une trame de balise « Beacon » RI-MAC pour une radio IEEE 802.15.4.....	38
<b>Figure -III.9-</b> Le double rôle d'une balise « Beacon » dans RI-MAC .....	39
<b>Figure -III.10-</b> Machine a état finis du fonctionnement du protocole RI-MAC (cas : d'un nœud émetteur) .....	41

<b>Figure -III.11-</b> Machine a état finis du fonctionnement du protocole RI-MAC (cas : d'un nœud récepteur) .....	<b>42</b>
<b>Figure -IV.1-</b> Premier affichage Cooja .....	<b>45</b>
<b>Figure -IV.2-</b> fichier de configuration .....	<b>45</b>
<b>Figure -IV.3-</b> Création d'une nouvelle simulation .....	<b>46</b>
<b>Figure -IV.4-</b> Écran initial de simulation Cooja .....	<b>46</b>
<b>Figure -IV.5-</b> Ajouter Motes .....	<b>47</b>
<b>Figure -IV.6-</b> Parcourir le Mote .....	<b>47</b>
<b>Figure -IV.7-</b> Choisissez un dossier d'exemples de simulation .....	<b>48</b>
<b>Figure -IV.8-</b> Compilation de Mote Cooja .....	<b>48</b>
<b>Figure -IV.9.-</b> Ajouter des Motes Cooja .....	<b>49</b>
<b>Figure -IV.10-</b> Topologie initiale créée .....	<b>49</b>
<b>Figure -IV.11-</b> Compilation de SINK .....	<b>50</b>
<b>Figure -IV.12-</b> Ajoute le sink cooja .....	<b>50</b>
<b>Figure -IV.13-</b> Graphique sur le simulateur cooja .....	<b>51</b>
<b>Figure -IV.14-</b> Le type de Topologie du réseau utilisé .....	<b>53</b>
<b>Figure -IV.15-</b> Consommation moyenne d'énergie en pourcentage .....	<b>54</b>
<b>Figure -IV.16-</b> Latence moyenne .....	<b>54</b>
<b>Figure -IV.17-</b> Taux de livraison des paquets .....	<b>55</b>

# Liste Des Tableaux

<b>Tableau -II.1-</b> Critères pour le choix d'un bon protocole MAC .....	<b>29</b>
<b>Tableau -II.2-</b> La comparaison de différents protocoles MAC pour RCSF .....	<b>29</b>
<b>Tableau -IV.1-</b> Paramètres utilisés dans la simulation .....	<b>53</b>
<b>Tableau -IV.2-</b> Evaluation des performances pour protocoles simulés.....	<b>56</b>

# Liste Des Acronymes et Abréviations

**ACK:** Acknowledge

**B-MAC:** Berkeley-MAC

**CCA:** Clear Channel Assessment

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

**CSMA/CD:** Carrier-sense multiple access with collision detection

**D-MAC:** Data-Gaming-MAC

**DCF:** Distributed Coordination Function

**DRAND:** Distributed Randomized TDMA Scheduling for Wireless Adhoc Networks

**EAR:** Eavesdrop And Register

**GPS:** Global Positioning System

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**LEACH:** Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy

**LPL:** Low Power Listening

**LPP:** Low Power Probing

**MAC:** Media Access Control

**OSI:** Open Systems Interconnection

**PW-MAC:** Predictive Wake-UP MAC

**RCSF :** Réseaux des capteurs sans fil

**RI-MAC:** Receiver-Initiated

**Rtr:** Request to transmit

**RTS/CTS:** Request to Send/ Clear to Send

**S-MAC:** Sensor-MAC

**SMACS:** Self-organizing Medium Access Control for Sensor networks

**SAR:** Sequential Assignement Routing

**SMP:** Sensor Management Protocol

**T-MAC:** Timeout-MAC

**TADAP:** Task Assignment and Data Advertisement Protocol

**TCP:** Transmission Control Protocol

**TDMA:** Temporal Division Multiple Access

**UDP:** User Datagram Protocol

**WSN:** Wireless Sensing Networks

**X-MAC:** A Short Preamble MAC Protocol

**Z-MAC:** Zebra-MAC

# ***Introduction Générale***

# Introduction générale

Dans le domaine des réseaux informatiques, de nombreuses nouvelles technologies ont vu le jour, notamment les réseaux de capteurs sans fil. Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est un réseau coopératif composé d'un ensemble de nœuds autonomes déployés dans la zone. L'objectif principal de déploiement d'un RCSF est de contrôler et de surveiller les propriétés physiques ou environnementales (par exemple, les vibrations, les polluants, la température, la pression, etc.). Ce type de réseau est devenu progressivement crucial dans plusieurs applications telles que la surveillance et le contrôle des processus industriels, la surveillance de la santé, la surveillance de l'environnement et de l'habitat, et les diagnostics médicaux. Cependant, les applications militaires telles que la surveillance du champ de bataille sont la principale motivation du développement des RCSF.

Dans les RCSF, la conservation de l'énergie est une fonctionnalité indispensable en raison de la nature des applications utilisant les RCSF et des périphériques à base de batteries composant ce type de réseau. Dans cette catégorie de réseau, la sous couche *MAC* est responsable des procédures d'accès aux canaux, de la planification, de l'accès à des tampons et à la gestion des supports partagés et du contrôle des erreurs, tout en offrant la fiabilité et l'efficacité. Il est également très important d'améliorer la durée de vie du réseau en gérant les communications entre les nœuds de capteurs. Cette dernière est assurée par des protocoles *MAC* basés sur la technique de « Duty-Cycle » dont chaque nœud dans le réseau peut basculer entre deux états « veille » et « éveil ». Ces protocoles peuvent être divisés en deux catégories: synchrones et asynchrones. Dans les protocoles *MAC* synchrones, chaque nœud est synchronisé avec son voisinage où chaque nœud émetteur peut transmettre un paquet à un récepteur prévu pendant leur période d'écoute sur la base de l'utilisation des messages de contrôles. L'objectif essentiel de ces protocoles est de réduire les pertes d'énergie. Par contre, les protocoles asynchrones réduisent la consommation d'énergie sans l'utilisation des messages de contrôle, les nœuds non pas besoin de synchronisation, un nœud émetteur peut attendre longtemps avant de transmettre le paquet.

Dans ce PFE, notre objectif de ce travail est de réaliser une étude comparative entre deux protocoles *MAC* asynchrones utilisés dans les RCSF en évaluant les performances d'un RCSF expérimental à l'aide du simulateur Contiki2.7 OS/COOJA et par l'utilisation de deux

types de protocoles MAC asynchrones différents; le premier utilise la transmission de trame de préambule telle que X-MAC et l'autre type est basé sur le paradigme de balisage qui utilise la transmission de trame de balise comme RI-MAC.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres.

- ❑ Dans le premier chapitre nous décrivons les réseaux de capteurs sans fil, en commençant par la description de l'architecture d'un nœud capteur suivi d'une présentation de l'architecture générale d'un RCSF. Ensuite nous présentons, tout d'abord les besoins des applications et quelques domaines d'applications des RCSF et après nous décrivons les différentes couches de la pile protocolaire utilisée par un nœud capteur et leurs différentes sources de consommation d'énergie dans ce type de réseau.
- ❑ Le deuxième chapitre présente certains protocoles MAC proposés pour les RCSF en donnant premièrement la description de quelques notions de base (la sous couche MAC, l'accès MAC, la technique de duty-cycle, etc.), puis nous présentons quelques protocoles MAC dédiés pour les RCSF. Enfin, nous comparons tous les protocoles examinés.
- ❑ Le troisième chapitre est consacré à la présentation des protocoles MAC destinés aux RCSF sélectionnés pour être utilisés dans nos simulations ainsi qu'à la description de leur fonctionnement.
- ❑ Le quatrième chapitre analyse les performances des protocoles MAC simulés et décrit les détails des simulations et les paramètres utilisés ainsi que les résultats des simulations obtenus.

Nous achevons ce mémoire en donnant une conclusion générale, et quelques perspectives futures en vue d'améliorer et d'étendre ce travail.

# ***Chapitre I***

***«Les Réseaux de Capteurs  
Sans Fil»***

## I.1 Introduction :

Le réseau de capteurs sans fil (RCSF) se compose d'un grand nombre de nœuds, soit situés à des emplacements spécifiques, ou répartis de manière aléatoire. La distribution aléatoire de ce réseau capteurs nécessite un algorithme auto-organisateur dans le protocole utilisé pour le réseau de capteurs. Pour un réseau robuste, ces capteurs doivent pouvoir résister à des conditions environnementales extrêmes (comme le feu et l'eau). En plus des contraintes environnementales, une contrainte très importante est l'économie de batterie. Dans le réseau de capteurs, s'il y a une perte d'un nœud de capteur, il y a une perte directe de communication. Donc il est très important que les batteries durent le plus longtemps possible étant donné que dans la plupart des applications ils sont placés aléatoirement. Cette utilisation liée à l'autonomie des capteurs. Il a donc été nécessaire d'allier technologie et faible coût. Les RCSF peuvent être programmés à un grand nombre de fins, telles que le contrôle d'intrusions, le calcul de températures, le calcul de changements climatiques, la surveillance des déplacements d'animaux, surveillance de malades [52]. Dans ce premier chapitre, nous introduisons d'abord la définition et l'architecture d'un nœud capteur puis dans la seconde étape nous exposons la description de la pile protocolaire utilisée dans un RCSF. Enfin, nous abordons les concepts de RCSF, tels que son architecture, ses caractéristiques, ses types, ses domaines d'application et bien sûr sa consommation d'énergie.

## I.2 Architecture d'un nœud de capteur :

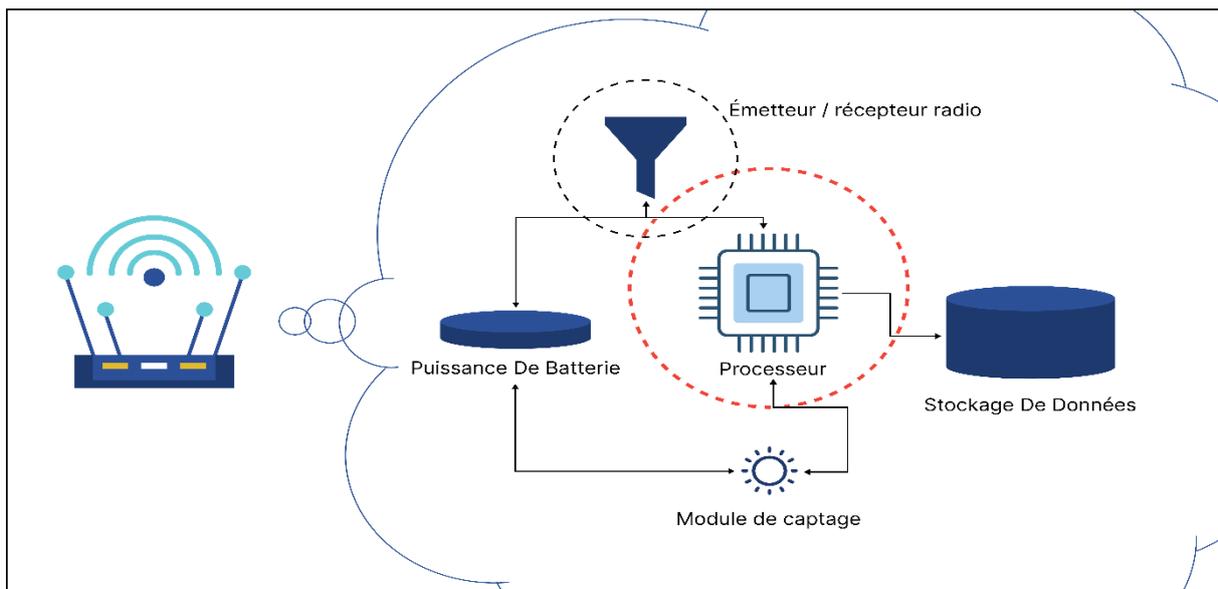


Figure-I.1- Anatomie d'un nœud capteur [52].

## Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

Généralement, un nœud capteur est composé de quatre unités : l'unité de captage, l'unité de traitement, l'unité de transmission, et l'unité de puissance (batterie), qui sont présentés dans la figure -I.2-, suivant son domaine d'application, il peut contenir aussi, des modules additionnels tels qu'un système de localisation (GPS : Global Positionning System), ou bien un système mobilisateur chargé de déplacer le capteur en cas de nécessité [52].

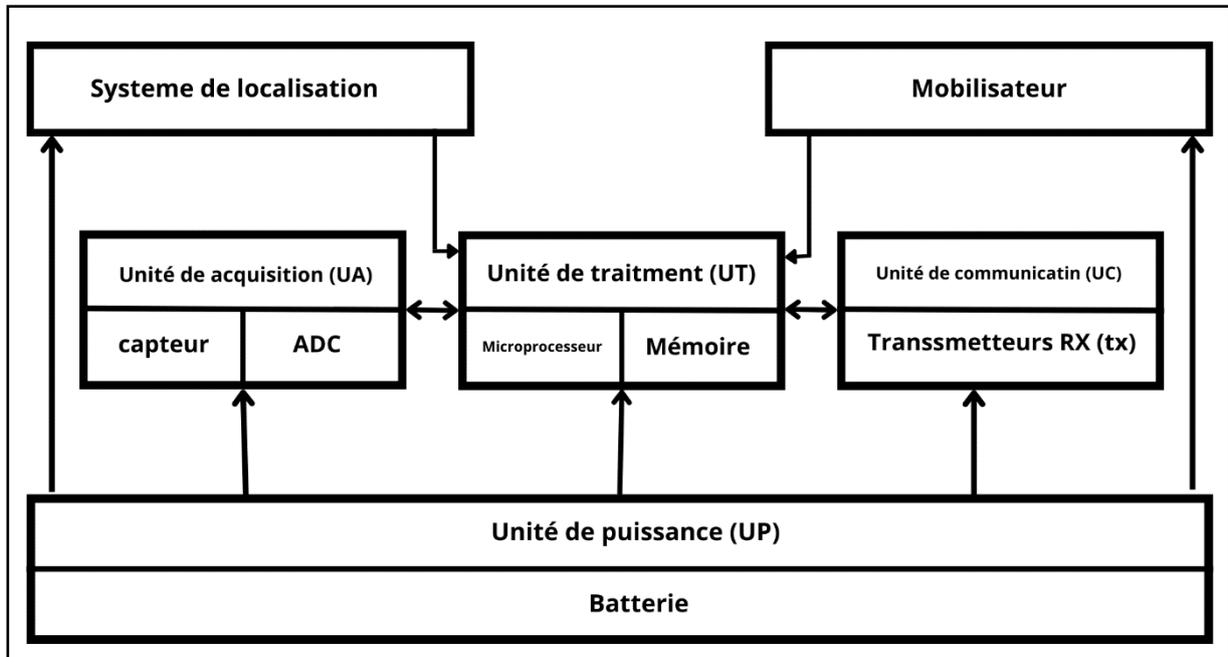


Figure -I.2- Architecture d'un nœud de capteur [55].

### a-Unité d'acquisition (UA): (ou de captage)

L'unité d'acquisition est composée d'un capteur et d'un ADC (Analog to Digital Converter) qui permet de convertir le signal produit par le capteur, sur la base du phénomène observé, en un signal numérique.

### b-Unité de traitement (UT):

L'unité de traitement est composée à la fois d'un processeur et d'une mémoire. Le processeur fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les capteurs et chargé d'exécuter des logiciels d'application et de la pile protocolaire de communications qui permettent de faire collaborer le nœud avec les autres nœuds du réseau afin de réaliser les tâches d'acquisition. Elle peut aussi analyser les données captées pour alléger la tâche du nœud puits (Sink) [55].

# Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

## c-Unité de communication (UC):

L'unité de communication effectue toutes les différentes opérations telles que la transmission et la réception de données via un support de communication sans fil qui peut être de type optique, ou de type radiofréquence (RF) et on peut aussi l'appeler unité émetteur/récepteur radio.

## d-Unité de puissance (UP):

L'énergie est nécessaire pour les nœuds, et il peut s'agir d'une source indépendante comme une batterie, ou elle peut être chargée de l'extérieur par un appareil de la récolte énergétique qui lui permet de le faire par exemple à partir d'une source d'énergie solaire.

## I.3 La pile protocolaire dans un RCSF :

Afin d'améliorer la robustesse du réseau, l'architecture en couches est approuvée, en vue de la mise en place effective du RCSF.

La pile protocolaire dans les RCSF comprend cinq couches à utiliser par les nœuds du réseau telles que : la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique ainsi que trois plans de gestion : le gestionnaire d'énergie, le gestionnaire de mobilité et le gestionnaire des tâches [33].

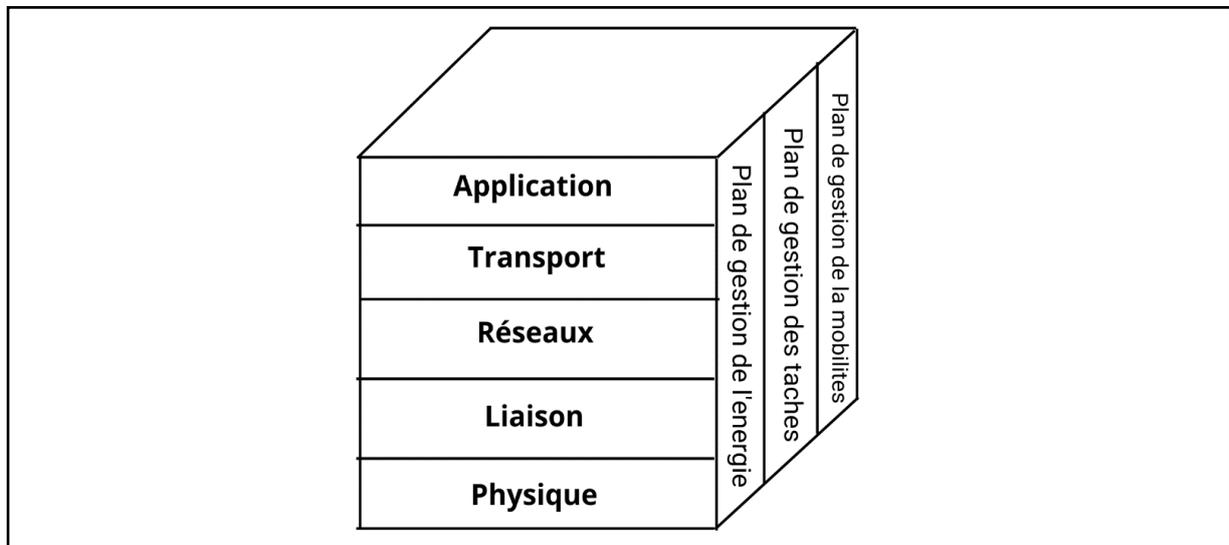


Figure -I.3- La pile protocolaire dans les RCSF [16].

### I.3.1 La couche physique :

Le rôle principal de cette couche est de garantir la connexion entre la pile protocolaire et la partie matérielle de communication réseau. Elle permet de transporter à travers le support réseau les bits constituant une trame de la couche liaison de données.

## Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

Cette couche accepte une trame complète de la couche liaison de données et le code sous la forme d'une série de signaux transmis au support local. Les bits codés composant une trame sont reçus par un périphérique final ou intermédiaire [55].

### I.3.2 La couche liaison de données :

En général, cette couche est responsable du multiplexage du flux de données, de la détection et le verrouillage des trames de données, du contrôle d'accès au média (MAC: Media Access Control), et du contrôle des erreurs. Elle assure une connexion fiable (point à point ou point à multipoints) selon la topologie du réseau de capteurs (comme illustré dans la figure -I.4-). Parmi les protocoles de liaison de données, nous citons : SMACS (Self-organizing Medium Access Control for Sensor networks) et EAR (Eavesdrop And Register) [13].

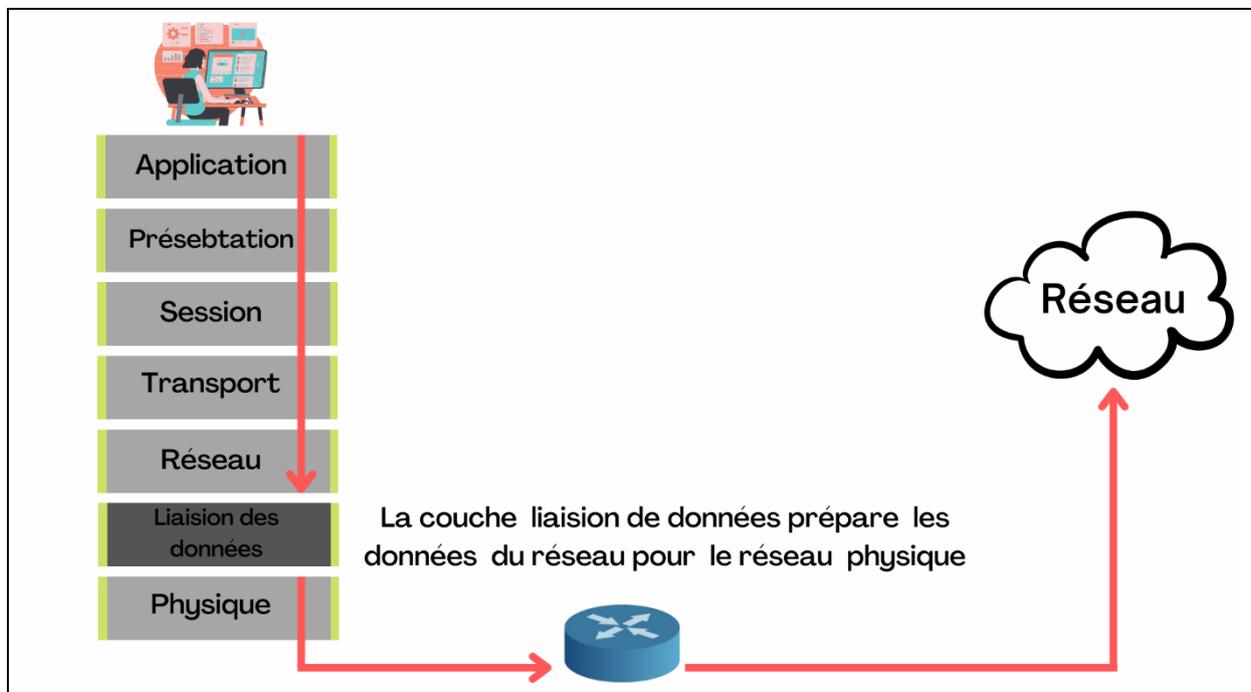


Figure -I.4- Le rôle de la couche liaison de données [13].

### I.3.3 La couche réseau :

Elle s'occupe du routage de données fournies par la couche transport. Elle établit les routes entre les nœuds capteurs et le nœud puits et sélectionne le meilleur chemin en termes d'énergie, délai de transmission, débit, etc.

Les protocoles de routage conçus pour les RCSF sont différents de ceux conçus pour les réseaux Ad Hoc puisque les RCSF sont différents selon plusieurs critères comme :

- L'absence d'adressage fixe des nœuds tout en utilisant un adressage basé-attribut.
- L'établissement des communications multi-sauts.

## Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

---

- L'établissement des routes liant plusieurs sources en une seule destination pour agréger des données similaires, etc.

Parmi ces protocoles, nous citons : LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) et SAR (Sequential Assignment Routing) [33].

### I.3.4 La couche transport :

Cette couche est responsable de la transmission et de la division des données en paquets, du contrôle du flux, du maintien de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

La couche de transport comprend deux protocoles :

- Protocole TCP (Transmission Control Protocol).
- Protocole UDP (User Datagram Protocol).

### I.3.5 La couche application :

La couche application est le niveau le plus proche des utilisateurs, gérée directement par les logiciels. Elle constitue l'ensemble des applications implémentées sur un RCSF. Ces applications doivent fournir des mécanismes permettant à l'utilisateur d'interagir avec le RCSF à travers différentes interfaces, et éventuellement, l'intermédiaire d'un réseau étendu (par exemple; Internet). Parmi les protocoles d'application, nous citons : SMP (Sensor Management Protocol) et TADAP (Task Assignment and Data Advertisement Protocol) [13].

### I.3.6 Plan de gestion de l'énergie :

Ce niveau est responsable de la façon dont les nœuds dépensent de l'énergie, car la durée de vie des nœuds est basée sur la durée de vie de la batterie. Par exemple à la réception d'un message un nœud peut désactiver son interface pour ne pas recevoir ce même message une seconde fois afin d'éviter de dépenser de l'énergie de manière inutile.

### I.3.7 Plan de gestion de mobilité :

Son rôle principal est de détecter les mouvements d'un nœud capteur et de connaître leur emplacement selon le type d'application utilisé.

## Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

### I.3.8 Plan de gestion des tâches :

Grâce à ce gestionnaire, les nœuds peuvent atteindre l'équilibre, en assurant une action collective entre eux en répartissant les différentes tâches du réseau, et en améliorant également la perte de puissance pour tous les nœuds.

### I.4 Les réseaux de capteurs sans fil :

Nous disons à propos de RCSF ou WSN (Wireless Sensor Networks) qu'il s'agit d'une zone géographique spécifique qui contient un ensemble de dispositifs appelés nœuds de capteurs. Chaque nœud capteur est capable de surveiller un phénomène spécifique et d'envoyer des informations à un ou plusieurs points de collecte, ces derniers étant interconnectés via une connexion sans fil, comme présenté dans la figure suivante [7] :

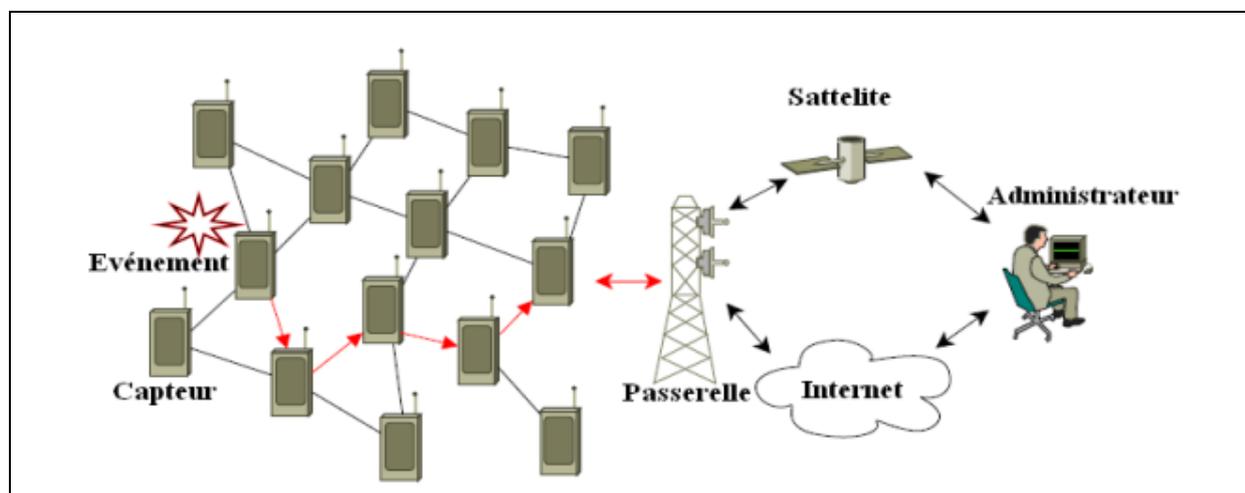


Figure -I.5- Schéma général d'un RCSF [7].

#### I.4.1 Architecture d'un RCSF :

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 –I.6-) [7].

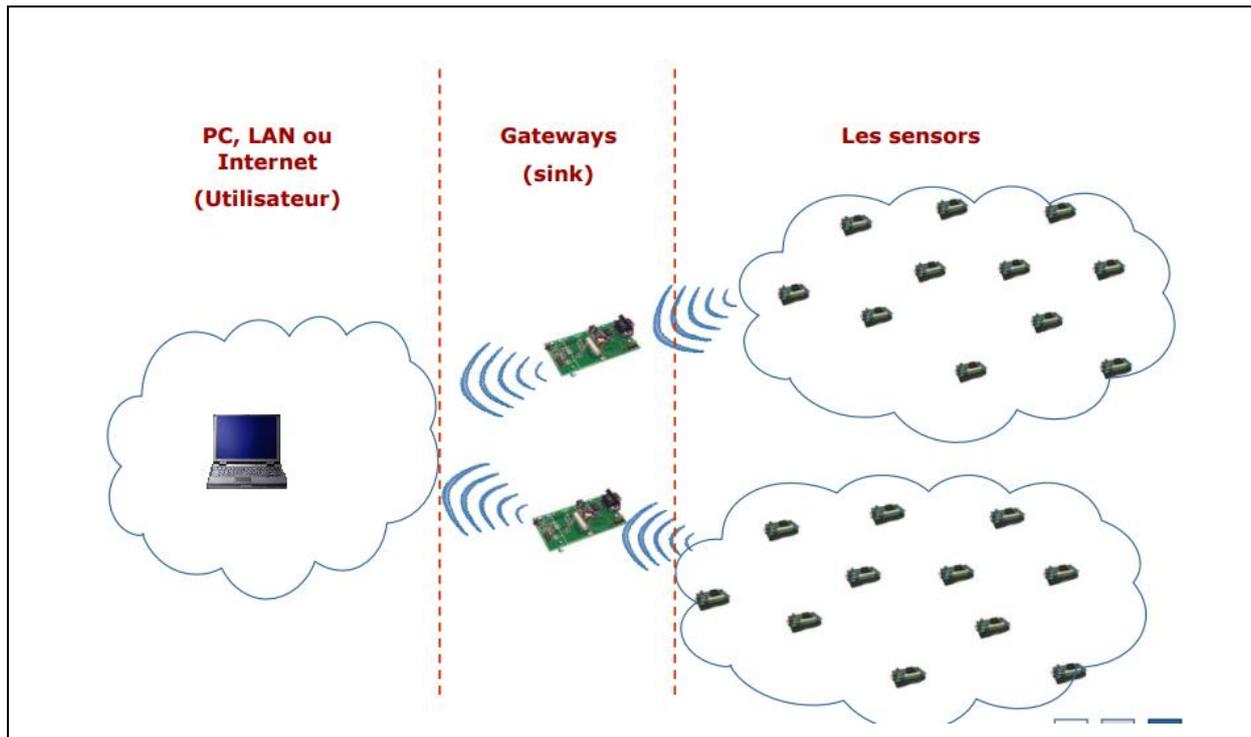


Figure –I.6- Architecture d'un RCSF [52].

### I.4.2 Les obligations des applications de RCSF :

#### 1 Le passage à l'échelle (scalabilité) :

Le bon fonctionnement du réseau est conditionné par la définition d'un schéma de déploiement efficace prenant en compte le caractère de forte densité. L'évolutivité est définie comme la capacité à déployer un grand nombre de nœuds dans une petite zone. C'est donné par la valeur qui calcule la distance entre les nœuds. Il est utilisé pour connaître exactement la densité, le rayon d'émission et le nombre moyen de nœuds adjacents pour un nœud particulier. En fait, le protocole conçu doit s'adapter aux changements que subit le réseau de capteurs. Par conséquent, la perte de nœud due à l'épuisement de la batterie au fil du temps, les nouveaux capteurs qui rejoignent ou quittent le réseau et provoquent des changements de densité, et les topologies sont des contraintes auxquelles les applications doivent répondre [23].

#### 2 L'efficacité énergétique :

L'efficacité énergétique est l'une des exigences lors de la conception du RCSF représentant une métrique de base à considérer. Compte tenu de la nature de ces réseaux et des conditions de déploiement dans les zones d'intérêt, le remplacement ou la recharge de la batterie du capteur est extrêmement difficile, voire impossible. Par conséquent, prolonger la durée de vie du pour chaque nœud de capteur est primordial pour prolonger la durée de vie d'un RCSF. Pour assurer cette efficacité énergétique, les solutions apportées par le protocole

## Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

---

conforme doivent éviter les effets ou les causes de surconsommation et de déperdition d'énergie. Par conséquent, les paramètres énergétiques doivent être pris en compte dans toutes

### 3 L'équité :

L'équité du partage des canaux signifie que différents utilisateurs, nœuds ou applications du réseau peuvent partager les canaux de manière juste et équitable. Il s'agit d'une exigence forte pour les réseaux voix ou données traditionnels, car chaque utilisateur souhaite une opportunité égale d'envoyer et de recevoir des données en fonction de ses besoins. Cependant, dans les réseaux de capteurs, tous les nœuds peuvent travailler ensemble vers un objectif commun et jouer des rôles différents. Pour cette raison, un nœud doit toujours envoyer plus de données que l'autre. Par conséquent, l'équité du partage de canaux est moins limitée aux applications de capteurs où les performances globales reposent davantage sur le partage de charge entre différents nœuds que sur le partage de canaux [37].

### 4 Auto organisation :

L'auto-organisation consiste en des nœuds capteur à s'organiser au sein du réseau de manière efficace pour assurer la connectivité entre eux dans la zone d'intérêt. En fait, les nœuds capteur sont petits et peu coûteux. Du fait de la faible capacité de stockage, il n'est pas possible d'embarquer une cartographie complète du réseau ou d'apprendre tout au long de la vie du réseau afin de ne pas saturer la mémoire. Il a peu de puissance de calcul et ne peut pas effectuer de calculs complexes tels que les intégrales. Pour prolonger la durée de vie d'un RCSF, les sources d'énergie sont limitées et vous devez économiser au maximum. Enfin, selon les applications, le capteur peut être mobile. Cela n'introduit pas toujours une topologie de réseau toujours dynamique et toujours manufacturable. Bien sûr, le plus gros défi concerne l'auto-organisation de ces capteurs en réseau et les primitives nécessaires pour remonter les données collectées. En raison des limitations matérielles et des détails des capteurs ci-dessus, la conception du protocole d'auto-organisation nécessite d'optimiser la perte de puissance et la coordination entre les nœuds [35].

### 5 Le débit :

Le débit est une mesure de performance commune à tous les réseaux. La communication a bit d'information par seconde. Certaines applications nécessitent un débit plus élevé que d'autres. Par exemple, un capteur spécifiquement conçu pour une application vidéo peut générer du trafic avec un débit très élevé par rapport au débit d'une application de messagerie. Cette métrique prouve que le réseau peut constamment envoyer des informations

## Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

---

au point focal. De nombreux facteurs affectent le débit, notamment la latence, l'utilisation des canaux et l'efficacité du mécanisme. Éviter les collisions et les phénomènes aériens [49].

### **6 La latence :**

La latence est le temps moyen entre l'envoi d'une information ou d'un paquet par une source et sa réception par une destination. Ce temps inclut le retard et le temps de propagation dans la file d'attente pour le capteur ou le point de collecte. Chaque nœud de transmission initie une requête pour envoyer un paquet de données au puits avant le premier créneau de la trame, de sorte que ce créneau est considéré comme le temps de référence dans le calcul du retard. Dans des applications telles que la surveillance et le contrôle, le nœud est une alarme et est inactif pendant une longue période jusqu'à ce qu'un événement soit détecté. Ces applications peuvent souvent tolérer des retards de transmission de messages supplémentaires. Avec la communication multi-sauts, vous pouvez économiser beaucoup d'énergie en réduisant le délai en réduisant le nombre de sauts [35].

### **I.4.3 Domaines d'application des RCSF :**

La diminution de la taille et le coût des micro-capteurs, la large 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, ils permettent aussi d'enrichir les applications existantes et de faciliter la conception 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, de propagules, etc. [20].

Les réseaux de capteurs pourraient révolutionner la manière même de comprendre et de construire les systèmes physiques complexes, notamment dans les domaines militaire, environnemental, domestique, sanitaire, de la sécurité, etc.

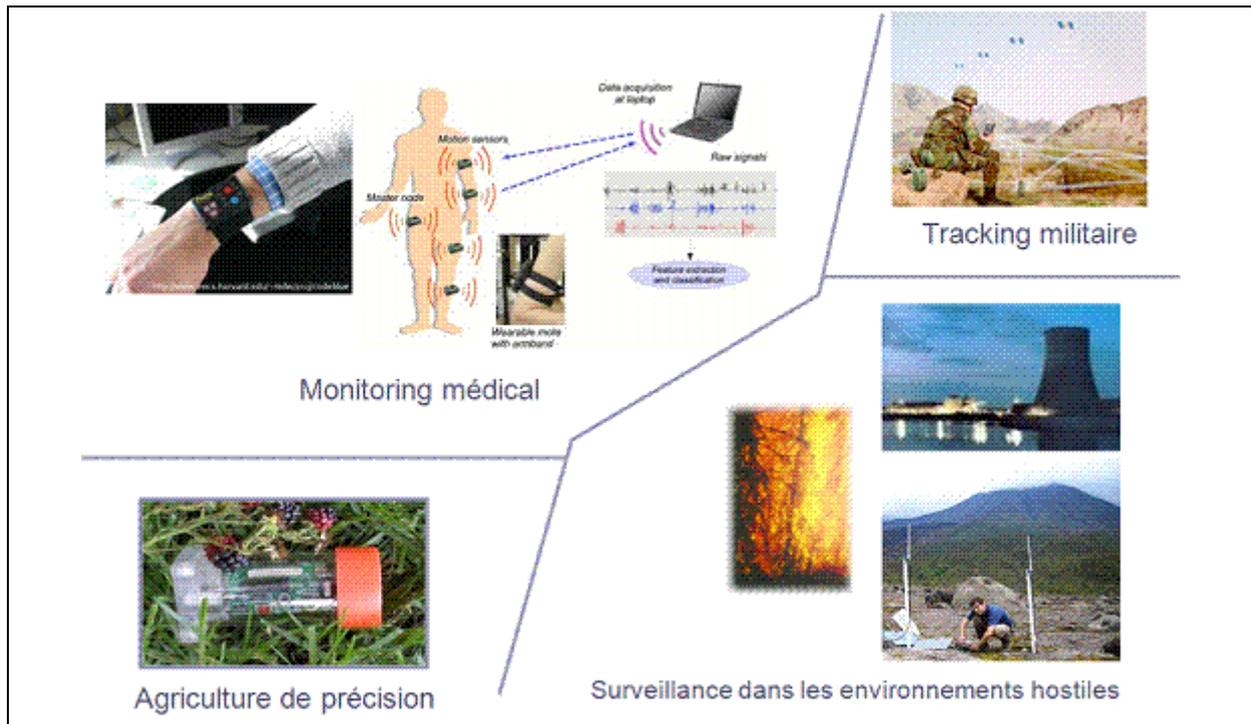


Figure –I.7- Applications des RCSF [52].

### 1- Applications militaires :

Comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (amis ou ennemis). Des tests concluants auraient déjà été réalisés par l'armée américaine dans le désert de Californie [20].

### 2- Applications environnementales :

RCSF peut être utilisé pour surveiller certains paramètres dans un secteur particulier. Les nœuds capteurs peuvent fournir des informations précises sur la température et la pression. Il peut également être utilisé pour surveiller les fuites de gaz, détecter les incendies et contrôler la pollution. Un exemple d'utilisation du RCSF dans le domaine de l'environnement est le projet ARGO [4]. Le projet met en œuvre plusieurs capteurs pour surveiller la température de l'eau de mer, le sel et la vitesse. La durée de vie du nœud utilisé est d'environ 45 ans. La deuxième expérience a été menée par Intel Research Laboratory et Archive and Agri Food Canada [30] pour surveiller les zones arides dans le secteur agricole.

## Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

---

### 3- Applications médicales :

Pour les applications de soins de santé, les capteurs prennent en charge une interface pour les personnes handicapées, la surveillance intégrée des patients, le diagnostic hospitalier et l'administration de médicaments, la surveillance à distance des données physiologiques humaines, le suivi et la surveillance des patients hospitalisés.

Il agit dans le corps humain pour traiter certains types de maladies. Comme exemple de projet est la création d'une rétine artificielle composée de 100 micro-capteurs pour corriger la vision [21].

### 4- Applications commerciales :

Les nœuds capteurs ont le potentiel d'améliorer le processus de stockage et de livraison (notamment pour assurer la chaîne du froid). Le réseau ainsi formé peut être utilisé pour connaître l'emplacement, l'état et l'orientation du colis ou de la cargaison. Les clients en attente d'un colis recevront des notifications de livraison en temps réel et connaîtront l'emplacement du colis. Les fabricants peuvent suivre le processus de production depuis les matières premières jusqu'au produit final livré via un réseau de capteurs. Les réseaux de capteurs permettent aux entreprises d'offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant les coûts. Si le microcapteur garantit un bon état, le produit utilisé peut être mieux démonté et recyclé ou réutilisé. Dans les bâtiments, les systèmes domotiques pour le chauffage et le refroidissement, l'éclairage et la distribution d'eau peuvent optimiser l'efficacité grâce à des microcapteurs sur les carreaux de sol tels que les murs, les cadres de porte et les meubles. Le système ne fonctionne que quand et à la bonne échelle en cas de besoin. Les déploiements à grande échelle de telles applications réduiront la demande énergétique mondiale et réduiront indirectement les émissions de gaz à effet de serre. Aux États-Unis seulement, ces économies sont estimées à 55 milliards de dollars par an, réduisant les émissions atmosphériques de CO<sub>2</sub> de 35 millions de tonnes. Par conséquent, la communauté des affaires peut réduire l'impact environnemental sur le climat [21].

#### I.4.4 Modèle de communication dans les RCSF :

##### 1- La communication mono-saut :

Contrairement aux réseaux câblés, où un dispositif doit être connecté physiquement, le milieu sans fil est ouvert et accessible à tout le monde. Par conséquent, toute transmission peut facilement être interceptée, altérée, ou retransmise par un attaquant. De plus, le nœud malveillant peut endommager les paquets de données en provoquant des collisions et des interférences dans le canal de transmission. D'un autre point, la communication sans fil est

## Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

particulièrement coûteuse d'un point de vue énergétique (un bit transmis est équivalent à environ un millier d'opérations CPU). C'est pourquoi on ne peut pas utiliser des mécanismes de sécurité compliqués, impliquant l'échange d'un grand nombre de messages entre les nœuds capteurs [48].

### 2- La communication multi-saut :

Est un type de communication dans les réseaux radio dans lesquels la zone de couverture du réseau est plus grande que la portée radio des nœuds uniques. Par conséquent, pour atteindre une destination, un nœud peut utiliser d'autres nœuds comme relais. Étant donné que l'émetteur-récepteur est la principale source de consommation d'énergie dans un nœud radio et que la transmission longue distance nécessite une puissance élevée, dans certains cas, le routage multi-sauts peut être plus économe en énergie que le routage mono-saut [48].

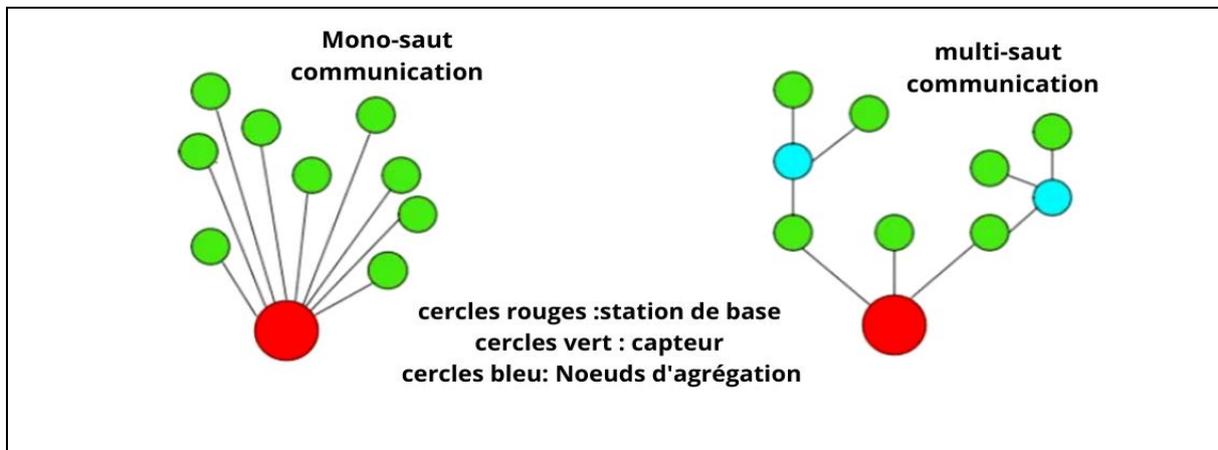


Figure -I.8- La communication mono-saut et multi-saut dans les RCSF [47].

### I.4.5 La consommation d'énergie dans les RCSF :

L'économie d'énergie est une des problématiques majeures dans les réseaux de capteurs. En effet, la recharge des sources d'énergie est souvent trop coûteuse et parfois impossible. Il faut donc que les capteurs économisent au maximum l'énergie afin de pouvoir fonctionner. Les réseaux de capteurs fonctionnant selon un mode de routage par saut, chaque nœud du réseau joue un rôle important dans la transmission de données. Le mauvais fonctionnement d'un nœud implique un changement dans la topologie et impose une réorganisation du réseau [26].

#### A- Le routage des données dans le réseau :

Les réseaux de capteurs utilisent un routage multi-sauts. Dans de tels cas, de mauvaises politiques de routages peuvent avoir un impact significatif sur la durée de vie du réseau et la consommation d'énergie [26].

### **B- Etat du module radio :**

Cette radio est le composant de nœud de capteur le plus consommateur d'énergie du car il assure la communication entre les nœuds jusqu'à la station de base. Les modules radio sont caractérisés par quatre états [31] :

- **Etat transmission** : la radio est en transmission des données.
- **Etat sommeil (veille)** : la radio est hors tension.
- **Etat réception** : la radio est en réception des données.
- **Etat d'écoute (idle)** : la radio est en écoute donc perte d'énergie inutile. Pour conserver cette perte, un nœud ne doit s'activer que lorsque c'est nécessaire autrement, il se met en état sommeil (veille).

### **C- Mode de propagation du signal radio :**

Il s'agit de la force estimée du signal radio reçu à n'importe quelle distance de l'émetteur. Dans ce cas, la consommation d'énergie est justifiée par des phénomènes tels que la réflexion du signal, la diffusion et la diffraction par divers obstacles.

### **D-Accès au médium de transmission :**

Étant donné que les nœuds capteurs partagent le même support de transmission, la couche MAC joue un rôle important dans la coordination des nœuds. À ce niveau, une quantité importante d'énergie est effectivement utilisée ou simplement gaspillée inutilement sur le réseau [29].

### **1- La consommation d'énergie d'un nœud capteur :**

L'énergie consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes [39] :

#### **a) Energie de capture :**

L'énergie de capture est consommée pour effectuer des tâches telles que l'échantillonnage, le traitement du signal, la conversion analogique-numérique et l'activation de la sonde de capture. En général, la puissance acquise représente un faible pourcentage de la puissance totale consommée par un nœud.

#### **b) Energie de traitement :**

L'énergie de traitement est divisée en deux parties : l'énergie de commutation et l'énergie dissipative. L'énergie de commutation est déterminée par la somme de la tension d'alimentation au niveau du logiciel et des condensateurs commutés (en exécutant le logiciel). D'autre part, l'énergie de fuite correspond à la consommation d'énergie lorsque l'unité de

## Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

calcul ne traite pas. Généralement, la puissance de traitement est faible par rapport à la puissance de traitement requise pour la communication.

### c) Energie de communication :

L'énergie de communication se compose de deux parties :

Recevoir de l'énergie et transmettre de l'énergie. Cette énergie est déterminée par la quantité de données communiquées et la distance parcourue, ainsi que les caractéristiques physiques du module sans fil. L'émission d'un signal est caractérisée par son intensité. Plus la puissance d'émission est élevée, plus la portée du signal est longue et plus la consommation d'énergie est élevée. Notez que la puissance de communication représente la plus grande partie de la puissance consommée par le nœud de capteur.

### 2- Les sources des pertes d'énergie :

Il existe de nombreuses causes de perte d'énergie dans les nœuds de capteurs [19]:

#### a) La retransmission :

Les nœuds de capteurs ont généralement une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. De plus, la transmission simultanée de données à partir de plusieurs capteurs peut provoquer des collisions et la perte d'informations transmises. La retransmission des paquets perdus peut réduire considérablement les performances.

#### b) L'écoute active :

L'écoute active (idle-listening) sur les canaux susceptibles de recevoir des paquets non reçus peut entraîner une perte importante de capacité énergétique des nœuds. Pour contourner ce problème, le nœud doit être en mode veille aussi longtemps que possible.

#### c) La sur-écoute :

Le phénomène de sur-écoute se produit lorsqu'un nœud reçoit un paquet non intentionnel (Figure -I.9-). Lorsque vous écoutez, vous perdez plus d'énergie car d'autres capteurs sont impliqués dans la réception des données.

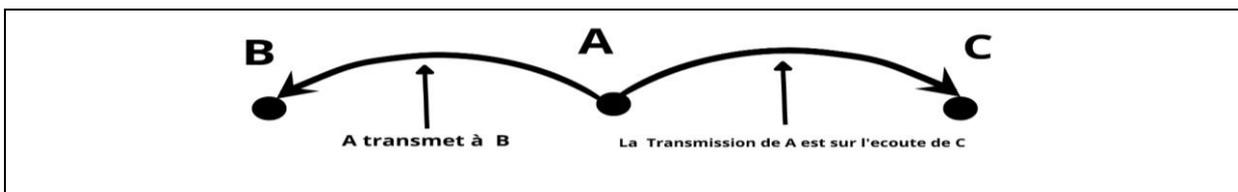


Figure-I.9- La sur-écoute dans une transmission [29].

## Chapitre I : Les réseaux de capteurs sans fil

---

### **d) La surcharge :**

Certains protocoles MAC fonctionnent en échangeant des messages de contrôle (overhead) pour fournir diverses fonctions telles que la signalisation, la connectivité, la planification d'accès et l'évitement des collisions. Tous ces messages nécessitent une énergie supplémentaire.

### **e) La surémission :**

Le phénomène de surémission (overemitting) se produit lorsque le nœud capteur envoie des données à un récepteur qui n'est pas prêt à recevoir les données. En effet, les messages envoyés sont considérés comme inutiles et consomment de l'énergie supplémentaire.

### **f) La taille des paquets :**

La taille des messages échangés sur le réseau influe sur la consommation énergétique des nœuds : émetteur et récepteur. Par conséquent, la taille du paquet ne doit être ni trop grande ni trop petite. S'il est petit, le nombre de paquets de contrôle (accusé de réception) généré augmente en fait la surcharge. Sinon, les gros paquets nécessitent une grande quantité de puissance de transmission.

## **I.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractères et les fonctionnalités et les réseaux de capteurs sans fil où nous avons abordé presque tous les aspects de cette technologie, des concepts généraux aux communications et aux applications. Ainsi, dans le reste de ce chapitre, nous avons montré les composants de base et quelques concepts nécessaires pour comprendre le problème. De plus, ce chapitre nous a permis de comprendre et d'attirer l'attention sur les enjeux liés à la minimisation de la consommation d'énergie et aux performances des protocoles de communication dans ce type de réseau, qui font l'objet de presque toutes les réflexions aujourd'hui. Dans le chapitre suivant, nous nous concentrerons sur la communication entre les différentes unités de réseaux de capteurs sans fil, tout en nous concentrant sur les protocoles MAC proposés dans la littérature.

# ***Chapitre II***

**« Les protocoles MAC pour les  
RCSF »**

## Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF

### II.1 Introduction :

Dans le chapitre précédent nous avons présenté d'une manière plus générale les réseaux des capteurs sans fil avec leurs caractéristiques et quelques contraintes.

Dans cette catégorie de réseaux, la couche MAC (Medium Access Control) est responsable sur les actions d'accès au canal, sur la planification et accès temporaire à l'encadrement intermédiaire commun et contrôle des erreurs tout en offrant la fiabilité et l'efficacité. Il est-elle aussi très importante pour l'amélioration de la durée de vie du réseau en gérant les connexions entre les nœuds de capteur, mais avant cela, les protocoles MAC optimisent le débit, la latence et l'équité, mais ils doivent d'abord être économes en énergie.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter la sous-couche MAC, les propriétés des protocoles MAC adaptés aux RCSF, puis nous exposons les propriétés souhaitables aux protocoles MAC. Enfin, ce chapitre se termine par la représentation de la classification des protocoles MAC dits à faible duty-cycle et une comparaison de ces différents protocoles MAC dédiés pour les RCSF.

### II.2 La sous couche MAC :

La sous-couche de contrôle d'accès au support, est la moitié basse de la couche de liaison de données du modèle OSI. Cette couche est également responsable du multiplexage des données et du contrôle des erreurs de transmission. En outre, elle assure la liaison point à point et multipoint dans les RCSF. La couche MAC (Medium Access Control) assure plusieurs fonctionnalités dans les communications au sein du réseau.

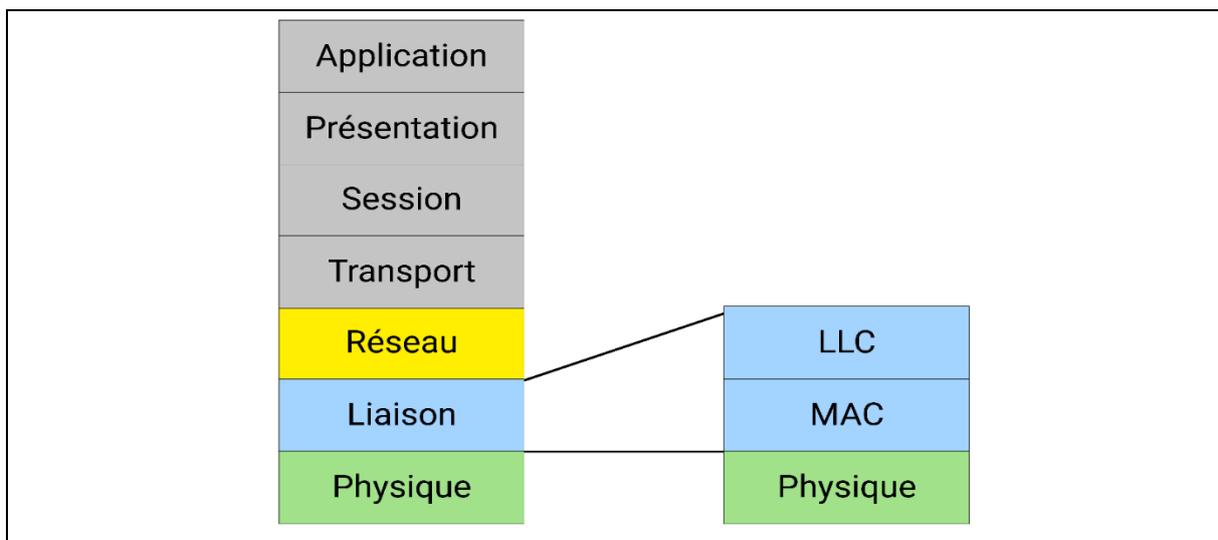


Figure -II.1- La sous couche MAC dans le modèle OSI [27].

### II.3 L'accès MAC :

#### II.3.1 Le protocole CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) :

CSMA/CA adapte les procédures de traitement des collisions (CSMA/CD) utilisées dans les réseaux Ethernet semi-duplex aux défis des réseaux sans fil. CSMA/CD n'essaie pas d'éviter directement les collisions. Au lieu de cela, le protocole interprète la collision comme évidente et met en place un mécanisme permettant aux participants du réseau de continuer en cas de collision afin d'empêcher que la collision ne se reproduise à la deuxième tentative. Deuxièmement, la station doit surveiller un temps aléatoire (déterminé par l'algorithme d'interruption) après l'échec de la transmission afin que deux participants ne reprennent pas la transmission en même temps (c'est la cause de l'interruption) [14].

#### II.3.2 Le protocole DCF (Distributed Coordination Function) :

La technologie d'accès multiple à détection de porteuse (DCF) contrôle le temps d'attente avant qu'une station commence à émettre sur un support libre (support). Le DCF alloue également une période de créneau spécifique aux participants du réseau pour d'autres actions, créant ainsi une structure temporelle limitée. Cette procédure est l'axe central de l'évitement des collisions. La structure temporelle complexe vous permet d'éviter les collisions. DCF prend en compte différents intervalles lors de la création d'une structure de temps [14].

#### II.3.3 L'Algorithme de backoff :

L'algorithme de Backoff est un mécanisme de résolution de conflits utilisé dans le protocole MAC à accès aléatoire (CSMA/CD). Cet algorithme est couramment utilisé sur Ethernet pour programmer des retransmissions après une collision.

En cas de collision entre deux stations, la transmission peut être reprise dès que possible après la collision. Cela conduit toujours à une autre collision, formant une boucle infinie de collisions qui mène à une impasse. Des algorithmes de backoff sont utilisés pour empêcher de tels scénarios [9] :

#### II.3.4 Le mécanisme de CCA (Clear Channel Assessment) :

Indique si le canal est libre ou occupé. Cet indicateur est calculé selon au moins une des trois méthodes suivantes :

- Power Exceeding Threshold (Énergie dépassant le seuil) : cet indicateur doit indiquer si le signal reçu est supérieur à un certain seuil ED, si oui le support de transmission est occupé.

## Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF

- Mode sens de carrière : cette méthode indique que le média est occupé lorsque la puissance du signal reçu par la technologie de modulation et d'étalement de spectre IEEE 802.15.4 est supérieure ou inférieure au seuil ED.
- Mode de détection de porteuse avec détection forte ou (mode de détection de porteuse avec mode de détection d'énergie) : une combinaison des modes précédents où la puissance du signal reçu utilisant la modulation IEEE 802.14.5 est supérieure au seuil ED. (Nouveau modèle pour le positionnement des capteurs avec contraintes de localisation)[34].

### II.3.5 Terminal caché et terminal exposé :

CSMA / CA est bon pour éviter les collisions à un seul saut, mais il ne peut pas résoudre les problèmes à plusieurs sauts. Il existe deux scénarios dans lesquels CSMA / CA ne fonctionne pas et les performances chutent considérablement. Il s'agit d'un point de terminaison caché et d'un point de terminaison publique. La Figure -II.2- montre un scénario de terminal masqué. Le nœud C est en dehors de la zone d'interférence de A et ne peut pas détecter l'activité de A. Lorsque C exécute le CCA et envoie un message à B, A communique avec B pour détecter que les médias sont libres. Dans ce cas, le nœud A est un terminal caché par rapport à C [34].

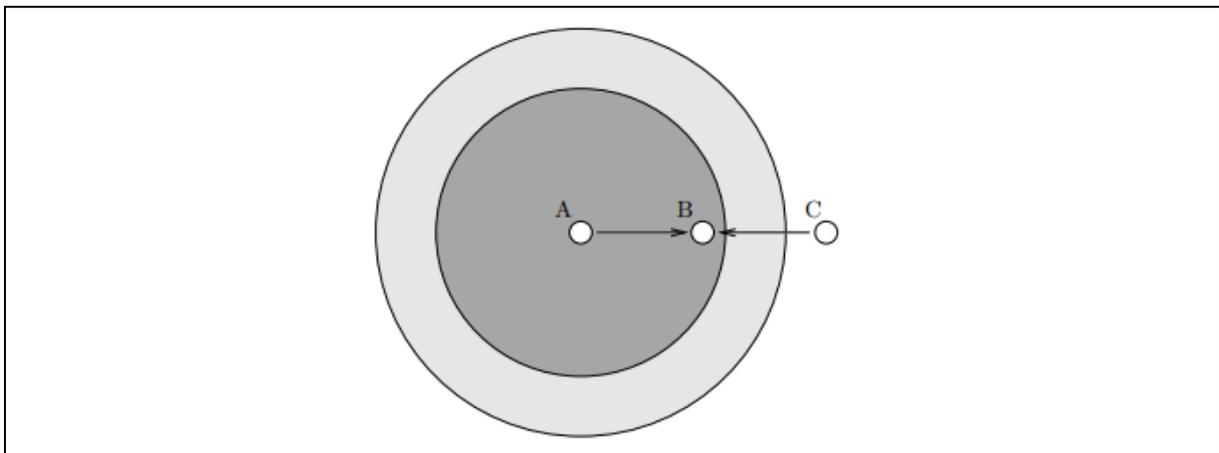


Figure -II.2- Un scénario de cas de terminal caché [34].

La Figure -II.3- montre l'état des appareils publiés. Le nœud B veut communiquer avec C, mais ne le fait pas car il s'avère que le média est occupé pour la communication de A à D. B ne pouvait pas émettre alors que C, est prêt à recevoir sans risque de collision. Dans ce cas, B est le terminal exposé à la transmission de A [34].

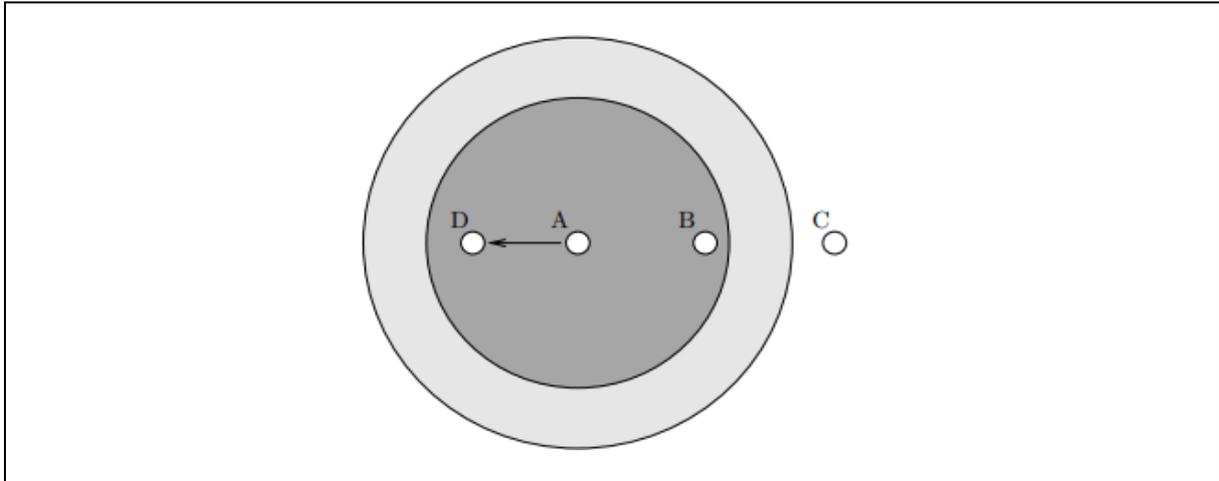


Figure -II.3- L'état des appareils publiés [34].

### II.4 La technique de cycle d'activité (Duty-cycle) :

Un bon protocole MAC à « duty-cycle » 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 [54].

### II.5 Les protocoles MAC pour les RCSF :

#### II.5.1 Les protocoles MAC synchrones :

Parmi les protocoles MAC basés sur la technique de "duty-cycle" les plus connus et les plus utilisés, on peut citer IEEE 802.15.4 [25]. Cela permet de définir les périodes actives et

## Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF

---

inactives dans le mode d'utilisation de la balise (beacon-enabled mode). Le cycle est appelé "superframe" et est marqué par une trame "beacon" envoyée par le coordinateur pour synchroniser les nœuds concernés dans la topologie en étoile. Chaque nœud ne communique qu'avec son coordinateur, qui est toujours actif pendant la période active. Le nœud associé au coordinateur est à l'écoute, donc le nœud sera également actif pendant la période active.

Du point de vue de l'efficacité énergétique, IEEE 802.15.4 maintient tous les nœuds actifs pendant la période active. Ce n'est pas optimal, surtout si le nœud n'a pas de données à envoyer ou à recevoir. Un autre problème est que ce mode "activé par balise" est conçu pour fonctionner dans des topologies en étoile et ne prend pas en charge nativement les réseaux multi-sauts. Cependant, Beacon est prévu pour fonctionner dans un réseau multi-saut organisé en arbre (cluster tree), il est difficile de passer à l'échelle car la planification est statique.

### 1- Le protocole S-MAC :

S-MAC (Sensor-MAC) [50] est l'un des premiers protocoles MAC développés pour les réseaux multi-sauts. Chaque nœud bascule périodiquement entre les périodes actives et inactives pour économiser de l'énergie. Initialement, chaque nœud est libre de choisir son propre Duty-cycle. Pour que le nœud émetteur trouve le nœud routeur voisin pendant la période active, S-MAC adopte la synchronisation suivante. Chaque nœud diffuse périodiquement un programme entre les périodes actives et inactives à ses voisins. Par conséquent, chaque nœud stocke le calendrier de tous les voisins pour savoir quand un voisin particulier entre dans la période active pour envoyer des données. Si plusieurs nœuds doivent envoyer des données à un seul routeur ou nœud récepteur, ils utilisent le IEEE 802.11 CSMA / CA avec RTS / CTS. En général, plusieurs nœuds peuvent diffuser différents horaires dans différentes zones de diffusion. Les nœuds voisins qui reçoivent des horaires différents adoptent alors ces différents rythmes et donc se réveillent pour des périodes actives différentes. Dans S-MAC, le nœud qui diffuse le plan en premier est le nœud synchroniseur et le nœud adjacent est le nœud suiveur. La première chose que vous pouvez voir est un protocole fixe avec un "cycle d'activité" qui ne s'adapte pas automatiquement aux fluctuations du trafic à moins que le nœud n'en crée un nouveau et ne le modifie explicitement. Le synchroniseur n'est pas fourni (mécanisme SMAC). Une autre mise en garde est que le délai de bout en bout dépend de la durée de chaque nœud du chemin et peut-être très long. La troisième mise en garde est que son trafic de contrôle (overhead de protocole) nécessite non seulement l'utilisation de RTS/CTS, mais diffuse également des messages de synchronisation/resynchronisation, de sorte qu'il représente une partie importante du trafic

## Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF

total. Enfin, la période active doit être suffisamment longue pour tolérer la dérive d'horloge. Cela le rend inutilisable avec des Duty-cycles très faibles.

### 2- Le protocole T-MAC :

T-MAC (Timeout-MAC) [43] étend S-MAC et propose quelques améliorations. Au lieu de fixer la période active, T-MAC raccourcit la période active après qu'aucune activité n'est détectée sur le canal. Une autre amélioration consiste à maintenir le nœud actif pendant la période de temporisation afin de maintenir le paquet en rafale. La période active est également réajustée pour s'adapter aux fluctuations du trafic (dans ce cas, le duty-cycle est variable). Une faille dans T-MAC est un problème d'interception car le nœud doit rester actif pendant un certain temps, même s'il n'est pas impliqué dans la communication.

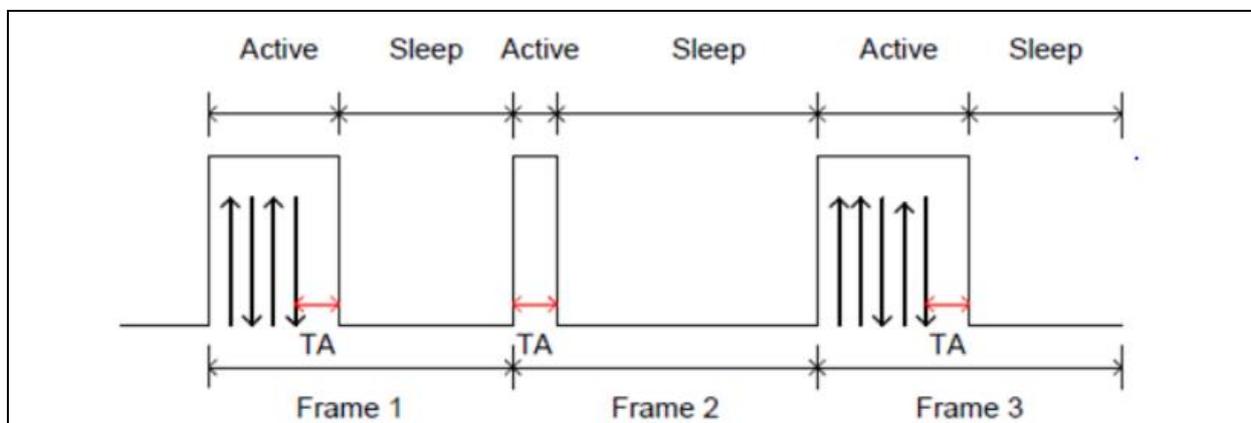


Figure -II.4- Le Duty-cycle adaptatif de T-MAC [43].

### 3- Le protocole D-MAC :

D-MAC (Data-Gaming-MAC) [19] propose une séquence de périodes d'activité bénéfique pour la collecte d'informations dans une topologie arborescente. Les nœuds de même niveau se réveillent en même temps. Les enfants du nœud accèdent au média en même temps, en utilisant un délai aléatoire (appelé backoff) pour éviter les conflits systématiques. Par conséquent, DMAC sous-estime la possibilité de collision, en supposant que les nœuds enfants sont mutuellement reconnaissables. DMAC suppose également qu'il faut moins de temps pour envoyer le trafic accumulé au nœud le plus proche de la route que la durée du duty-cycle.

### II.5.2 Les protocoles MAC asynchrones :

Contrairement aux protocoles de synchronisation, il n'y a pas de contrôle de surcharge de synchronisation, ce qui réduit la consommation d'énergie. Cependant, comme les nœuds de

## Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF

---

communication sont complètement isolés, le retard de l'émetteur peut être considérablement augmenté pour correspondre à la période active du récepteur (exemple : B-MAC, X-MAC ...).

### 1- Les protocoles MAC de préambules :

#### a) Le protocole B-MAC :

B-MAC (BerkeleyMAC) [5] utilise la technologie LPL (Low Power Listening). Le nœud alterne périodiquement entre actif et inactif (radio éteinte). L'état actif est généralement de très courte durée et permet uniquement au nœud de balayer le canal. Lorsque le nœud se réveille, la radio est allumée et l'état du canal est vérifié (CCA : Clear Channel Access). Si aucune activité n'est détectée, il se rendort. Sinon, il reste actif pour recevoir le paquet. Après réception, le nœud passe en mode veille. Côté émetteur, un long préambule est envoyé avant chaque transmission du paquet. La taille du préambule doit être supérieure à l'intervalle de réveil afin qu'il puisse être reconnu par le récepteur (saut suivant). Par conséquent, le destinataire est notifié pour recevoir le paquet de données. B-MAC offre une excellente efficacité énergétique et la période active de chaque nœud récepteur peut être prolongée ou raccourcie en fonction de la charge de l'émetteur. B-MAC fournit également une interface de haut niveau pour reconfigurer les intervalles de réveil afin de trouver le bon compromis entre la puissance et le débit du réseau. Le B-MAC s'appuie sur CSMA/CA pour l'accès aux médias, ce qui entraîne des problèmes de débit de charge élevée en raison de collisions. Un autre problème est que même si le paquet est destiné à un nœud particulier (saut suivant), les voisins ratent le préambule, car tous les autres voisins doivent écouter le préambule jusqu'à la fin. Cependant, gardez à l'esprit que cette interception est non seulement nuisible, mais également nuisible, car elle peut également être utilisée pour sélectionner plusieurs routeurs.

#### b) Le protocole X-MAC :

X-MAC [28] est une version améliorée de B-MAC qui résout le problème de sur-écoute. Au lieu d'envoyer un gros préambule, X-MAC le divise en une série de paquets de préambule plus petits qui contiennent l'adresse du destinataire du paquet à envoyer, avec un intervalle de temps entre eux. Ces intervalles permettent au nœud destinataire d'envoyer un acquittement lorsqu'il reçoit l'un de ces paquets de préambule. Dès que l'expéditeur reçoit l'accusé de réception, il reconnaît que le nœud de saut suivant est éveillé, arrête d'envoyer une série de paquets de préambule et envoie immédiatement le paquet au destinataire. Comme B-MAC, X-MAC fournit un auto-ajustement du temps de veille en fonction des fluctuations du trafic. X-MAC a un préambule plus court que B-MAC, ce qui améliore l'efficacité

## Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF

---

énergétique et réduit la latence. Pourtant, comme mentionné précédemment, X-MAC ne peut choisir qu'un seul routeur pour transférer les paquets vers la destination d'un réseau multi-sauts, même s'il existe plusieurs chemins. Cela peut conduire à des transmissions de bout en bout plus robustes. La question du faible débit à des charges élevées reste non résolue car CSMA / CA est toujours utilisé.

### **2- Les protocoles MAC de balisages :**

#### **a) Le protocole RI-MAC :**

Le protocole RI-MAC (Receiver-Initiated) est un protocole MAC asynchrone qui utilise de faibles duty-cycle et dépend de la transmission de données initiée par le récepteur pour fonctionner de manière efficace et efficiente sur une large plage de trafic. Ce protocole tente de minimiser le temps pendant lequel l'émetteur et le récepteur programment le pour occuper le support de transmission et trouver l'heure de rendez-vous et échanger des données tout en séparant les rapports cycliques d'émission et de réception. Chaque nœud se réveille périodiquement selon son propre programme pour voir si trames de données entrantes sont la destination [51]. Après avoir allumé la radio, si le canal est inactif, le nœud diffuse immédiatement une balise pour signaler qu'il est prêt à recevoir des trames de données. S'il y a des données à envoyer au nœud émetteur (S), le nœud reste actif et attend la balise de réception souhaitée du récepteur (R). Après avoir reçu la balise de R, le nœud S commence immédiatement à envoyer des données. Ceci est confirmé par R sur une autre balise. Dans l'effet, cette balise ACK a deux rôles. Autrement dit, activez l'accusé de réception de trame des données et démarrez une nouvelle transmission sur le même récepteur. Si aucune nouvelle donnée n'arrive, le nœud se mettra en veille.

RIMAC améliore considérablement le débit et la vitesse de livraison des paquets sur le réseau. Même sous des charges de trafic légères avec un protocole optimisé tel que X-MAC, RIMAC offre les mêmes performances élevées en termes de vitesse de livraison et de retard de paquets tout en conservant une efficacité énergétique significative.

#### **b) Le protocole PW-MAC :**

Predictive Wake-UP MAC (PW-MAC) [45].PW-MAC améliore les protocoles comme S-MAC et B-MAC car il utilise des horaires pseudo-aléatoires, donc tous les nœuds ne se réveilleront pas et transmettre en même temps, en évitant les collisions. Un nœud qui vient de se réveiller envoie une balise courte pour que les autres nœuds sachent qu'il est en place. Un expéditeur peut alors transmettre un paquet de données et demander plus d'informations au

## Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF

---

destinataire, telles que l'heure actuelle et la graine actuelle pour le pseudo horaire aléatoire utilisé par le récepteur. En utilisant la graine dans un générateur congruentiel linéaire (LCG), l'expéditeur dans PW-MAC peut prédire quand un récepteur se réveillera ; donc l'expéditeur dort jusqu'à un peu avant que le récepteur ne soit réveillé. Cependant, il existe des variantes matérielles qui génèrent des erreurs dans la prédiction de l'expéditeur. PW-MAC utilise un "temps d'avance de réveil de l'expéditeur", une valeur de compensation propre à chaque plateforme, y compris la dérive d'horloge, le système d'exploitation délai et latence matérielle. La valeur aide à corriger les erreurs que chaque nœud peut faire lorsque prédire une heure de réveil du récepteur. L'un des avantages de l'utilisation de PW-MAC est que dormir jusqu'au le récepteur est en place diminué efficacement le cycle de service pour l'expéditeur. De plus, le protocole a été testé sur du matériel, en utilisant des motes MicaZ, et l'empreinte mémoire est faible.

Les inconvénients de l'utilisation de PW-MAC incluent la surcharge créée par les balises et l'écoute inactive, même s'il est petit par rapport à d'autres protocoles tels que Wise MAC, RI-MAC et X-MAC.

### II.5.3 D'autres protocoles MAC :

#### 1- Les protocoles MAC Hybrides :

TDMA est un bon principe pour envoyer efficacement des volumes de trafic intermittents ou importants. En revanche, si le trafic est événementiel, il n'est pas efficace, car les créneaux horaires attribués aux nœuds sont souvent inactifs, ont une utilisation faible et modérée et consomment beaucoup d'énergie (écoute passive). En fait, CMSA est adapté à un faible trafic. En effet, il y a peu de collisions et le nœud peut accéder au canal sans attendre le slot alloué. TDMA convient à grandes quantités de trafic de données. L'idée d'un protocole hybride est d'utiliser l'un ou l'autre en fonction des conditions de circulation. L'idée semble simple, mais une mise en œuvre efficace présente de nombreux problèmes. En effet, nous devons être en mesure de voir l'état du trafic en temps réel et de basculer entre eux. Les contraintes d'économie d'énergie ajoutent au problème. En raison du cycle de service fixe, il est difficile de s'adapter aux fluctuations du trafic tout en minimisant la consommation d'énergie [6].

#### a) Le protocole Z-MAC :

Le Z-MAC (Zebra-MAC) est un protocole MAC hybride qui utilise un découpage temporel basé sur TDMA et qui gère l'accès au sein des slots par CSMA/CA [39].

## Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF

Après le déploiement du réseau, Z-MAC commence par une étape de découverte de voisinage à deux sauts, puis effectue une assignation des différents slots aux nœuds détectés en utilisant la méthode DRAND (Distributed Randomized TDMA Scheduling for Wireless Adhoc Networks). DRAND est un protocole distribué qui assure qu'un slot ne soit pas assigné à deux nœuds situés à moins de trois intervalles de temps.

Le principe est le suivant : pour accéder au canal, si le nœud est le propriétaire du slot courant, il doit attendre un temps  $T_0$ . Si le médium est libre il émet, sinon il attend et recommence la même démarche. Dans le cas où le slot appartient à un voisin à deux sauts, et s'il y a une forte contention d'un de ses voisins à deux sauts, le nœud n'a pas le droit d'utiliser ce slot. Le Z-MAC utilise la technique LPL présentée dans la partie précédente : comme les nœuds peuvent émettre à n'importe quel moment, les nœuds doivent écouter le médium périodiquement pour savoir s'il y a des émissions. La figure –II.5- illustre le principe de ce protocole.

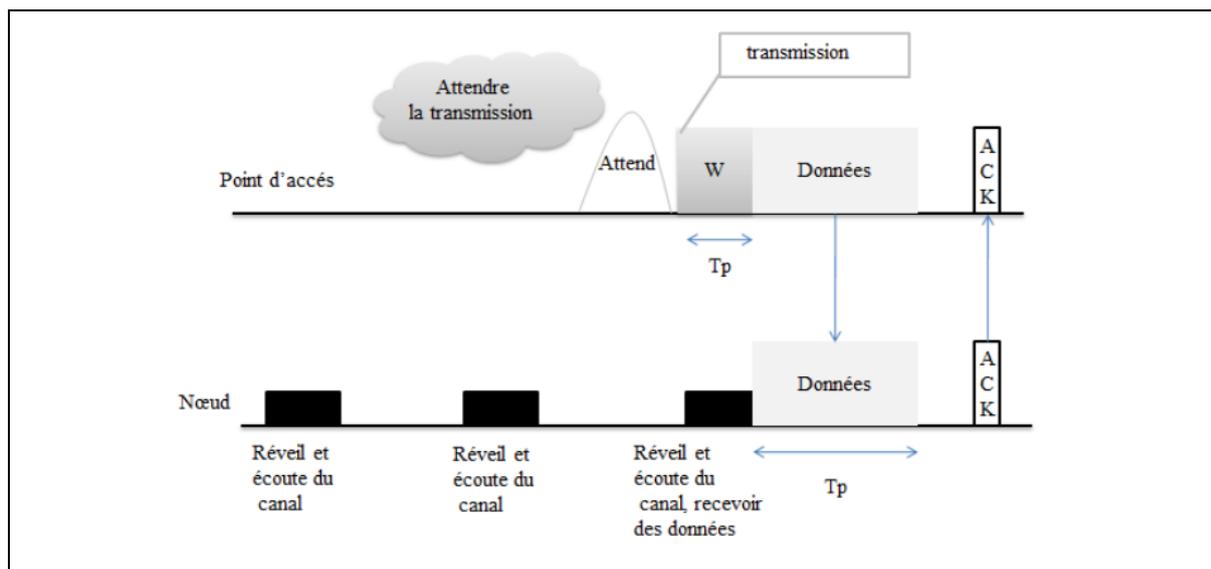


Figure –II.5- Protocole Z-MAC (ZebraMAC) [44].

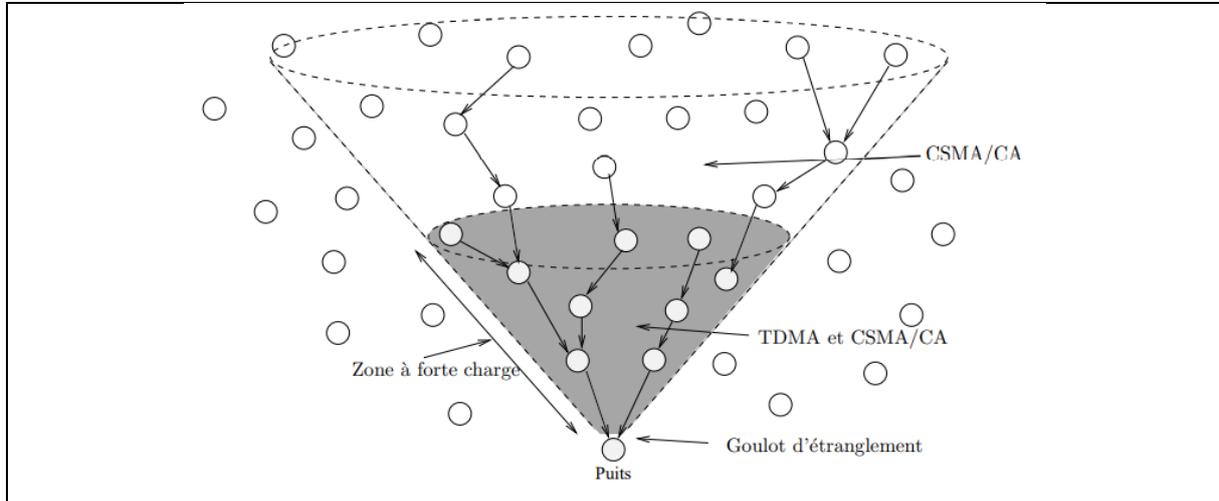
### b) Le protocole Funneling-MAC :

Comme son nom l'indique, Funelling MAC est proposé comme une solution à un goulot d'étranglement qui est un problème majeur dans les réseaux de capteurs. Cela se produit lorsque le nœud agit comme un puits de données et que tous les capteurs envoient du trafic de données.

Ce protocole adopte la méthode d'accès CSMA/CA pour l'ensemble du réseau durant un premier intervalle de temps puis, dans la zone à forte charge uniquement, pendant un

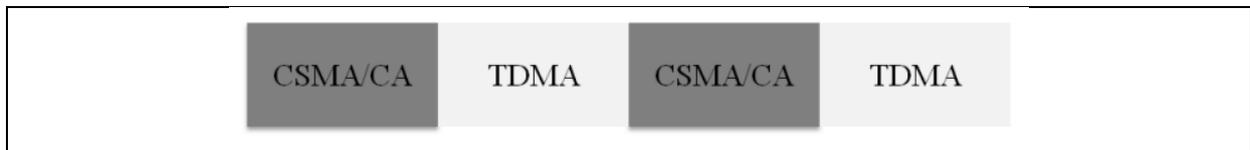
## Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF

second intervalle de temps l'utilisation du TDMA permet de garantir un temps d'accès minimal aux nœuds voulant transférer des données vers le puits. La figure –II.6- illustre le principe de ce protocole.



**Figure -II.6- Gestion du goulot d'étranglement dans Funneling-MAC. [8]**

Ces deux intervalles de temps constituent une super-trame présentée dans la figure –II.7- ci-dessous.



**Figure –II.7- Exemple de super-trame du protocole Funelling MAC [44].**

### II.6 La comparaison de différents protocoles MAC pour RCSF :

Auparavant, il n'existait pas de méthode standard pour comparer les performances des protocoles programmés et basés sur la contention, ou même pour des protocoles appartenant à la même catégorie. Le manque de paramètres d'évaluation standard a rendu la tâche difficile pour évaluer et sélectionner un protocole, même si les exigences d'une application particulière sont connues. Le nombre des protocoles de réseau de capteurs se développe rapidement, donc un ensemble des protocoles couvrant la plus large étendue possible ont été sélectionnés pour analyse. Ainsi plusieurs méthodes ou domaines des comparaisons pour les protocoles MAC ont été définis. À cela s'ajoute la nécessité d'établir des liens de communication entre les nœuds puisqu'un très grand nombre des nœuds capteur sont distribués au support dans le réseau de capteurs sans fil. Pour cette raison, le protocole MAC a deux objectifs. L'une consiste à construire une infrastructure de réseau de capteurs, et l'autre consiste à partager les

## Chapitre II : Les protocoles MAC pour les RCSF

moyens de communication de manière équitable et efficace [38]. Le tableau suivant résume les critères de base sur lesquels comparer les différents protocoles MAC dans RCSF.

<b>Critère</b>	<b>Description</b>
<i><b>Efficacité énergétique</b></i>	L'efficacité énergétique est le problème le plus important lors de la conception du protocole MAC pour les réseaux de capteurs sans fil. En effet, cette énergie détermine la durée de vie du réseau.
<i><b>Latence</b></i>	Le temps qu'il faut à un nœud pour envoyer un paquet avec succès.
<i><b>Robustesse</b></i>	Un ensemble d'attributs tels que la fiabilité, la connectivité et la durabilité indiquent le niveau de résilience du protocole contre les erreurs et les informations incorrectes.
<i><b>Scalabilité</b></i>	Capacité du système de communication indépendante du nombre de nœuds dans le réseau qui exécute la transaction.
<i><b>Stabilité</b></i>	Problèmes de trafic, capacité du système de communication à gérer la congestion dans des environnements volatils, les protocoles MAC doivent être capables de gérer des charges ou des changements qui peuvent surcharger le canal.
<i><b>Équité</b></i>	La plupart des applications RCSF ont une bande passante limitée, mais les stations de base doivent recevoir les informations de la même manière. La capacité du canal doit être partagée équitablement entre les nœuds sans compromettre l'efficacité du réseau.

**Tableau-II.1- Critères pour le choix d'un bon protocole MAC. [17]**

Chaque protocole MAC peut être distingué des autres protocoles par ses critères de préférence. Le tableau II.2 montre les priorités des critères précédents, le type d'accès au support de communication, l'implémentation matérielle ou logicielle, l'adaptabilité aux changements de topologie, et les différences entre plusieurs protocoles en fonction de leur besoin ou asynchronisme.

<i><b>Protocoles</b></i>	<i><b>Priorité</b></i>	<i><b>Types d'accès</b></i>	<i><b>Temps de sync</b></i>	<i><b>Adaptabilité aux changements</b></i>	<i><b>Implémentation</b></i>
S-MAC	Energie	CSMA	NON	BONNE	MATERIELLE
T-MAC	Energie	CSMA	NON	BONNE	MATERIELLE
D-MAC	Energie	CSMA	NON	BONNE	MATERIELLE
B-MAC	Energie	CSMA	NON	BONNE	SIMULATION/MATERIELLE
X-MAC	Energie	CSMA	NON	FAIBLE	MATERIELLE
RI-MAC	Energie	CSMA	NON	BONNE	MATERIELLE
PW-MAC	Energie	CSMA	NON	BONNE	MATERIELLE
Z-MAC	Energie	CSMA/TDMA	OUI	FAIBLE	SIMULATION
Funneling-MAC	Energie	CSMA/TDMA		BONNE	SIMULATION

**Tableau –II.2- La comparaison de différents protocoles MAC pour RCSF [6].**

### II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les travaux recensés dans la littérature, qui concernent principalement la conservation de l'énergie dans un RCSF. Nous avons d'abord présenté la sous couche MAC et la technique « duty-cycling » de la conservation d'énergie la plus utilisée dans les RCSF. À cette fin, nous avons exposé le fonctionnement détaillé, les points forts, les points faibles et la classification de plusieurs protocoles MAC développés pour les RCSF fonctionnant avec un faible cycle d'activité (duty-cycle). Par la suite nous avons donné une comparaison d'un point de vue théorique pour différentes métriques de ces protocoles MAC débattus, ce qui montre que la majorité de ces protocoles ont une efficacité énergétique.

# ***Chapitre III***

***« La description des  
protocoles MAC asynchrones  
simulés »***

### III.1 Introduction :

Dans les réseaux de capteurs sans fil, les protocoles MAC assurant la technique de duty-cycle peuvent être divisés en deux catégories : les protocoles MAC synchrones et les protocoles MAC asynchrones.

Les protocoles synchrones utilisent les deux périodes 'veille' et 'active' synchronisé afin d'améliorer la vitesse de transfert des données entre les nœuds dans un RCSF. Pendant, les protocoles asynchrones ne nécessitent pas de synchronisation des horaires des périodes de veille et active. Cependant, tous ces protocoles présentent des avantages et des inconvénients lorsqu'ils fonctionnent dans la sous-couche MAC.

Afin d'évaluer expérimentalement les performances de RCSF, nous avons étudié deux protocoles MAC différents : X-MAC et RI-MAC où le premier type est basé sur la transmission de la trame de préambule, et le deuxième type est de balisage basé sur l'envoi de la trame « Beacon ». Dans ce chapitre, nous présentons ces deux protocoles dont leur simulation et évaluation seront détaillées dans le chapitre suivant.

### III.2 objectifs :

Tous les protocoles MAC partagent presque le même objectif, ce qui est nécessaire au bon fonctionnement de RCSF, mais ces protocoles ne répondent pas à toutes les exigences de tous ceux qui ont besoin de ce réseau.

Notre objectif dans ce chapitre est la description des fonctionnements pratiques de ces deux protocoles mentionnés ci-dessus en identifiant leurs forces et leurs faiblesses afin de les simuler dans l'environnement de simulation choisi.

### III.3 Le protocole X-MAC pour RCSF :

#### III.3.1 Présentation du protocole X-MAC :

Le protocole X-MAC est un protocole de faible complexité et est une version améliorée de B-MAC.

Le X-MAC est conçu comme un protocole qui économise beaucoup d'énergie dans les RCSF au moyen d'accès à la couche de contrôle MAC. Son objectif est d'attribuer des intervalles de temps de veille plus longue aux nœuds pour optimiser la durée de vie du réseau et de se réveiller après des intervalles de temps réguliers pour participer à la communication.

Le X-MAC est aussi un protocole d'accès au support à détection de porteuse pour les réseaux sans fil incluant les réseaux des capteurs sans fil [53].

## Chapitre III : La description du protocole MAC asynchrones simulés

### III.3.2 Fonctionnement du protocole X-MAC :

X-MAC envoie une série de paquets de démarrage court, chacun contenant son adresse de récepteur, évitant ainsi le problème d'écoute des récepteurs non ciblés et économisant de l'énergie.

X-MAC insère une pause dans une série de paquets de démarrage court dans le but de créer un préambule fort qui permet au récepteur cibler de raccourcir le démarrage fort par un pré accusé de réception afin de pouvoir faire plus d'économie d'énergie pour l'émetteur et le récepteur ainsi que d'avoir une faible latence des paquets. On décrit un algorithme qui peut être utilisé pour ajuster les cycles de services dynamiquement afin de réduire la consommation d'énergie par paquets et la latence. L'expérimentation valide le gain de la performance et la réduction de la consommation de l'énergie du protocole X-MAC on le compare avec la méthode traditionnelle [53].

Lorsqu'un expéditeur veut transmettre une trame, il envoie à des moments aléatoires une courte trame de demande à la destination. Lorsque le récepteur se réveille et remarque une telle requête, il répond avec un ACK invitant l'expéditeur à envoyer sa trame de données. Cette opération est résumée dans la Figure -III.1- [32].

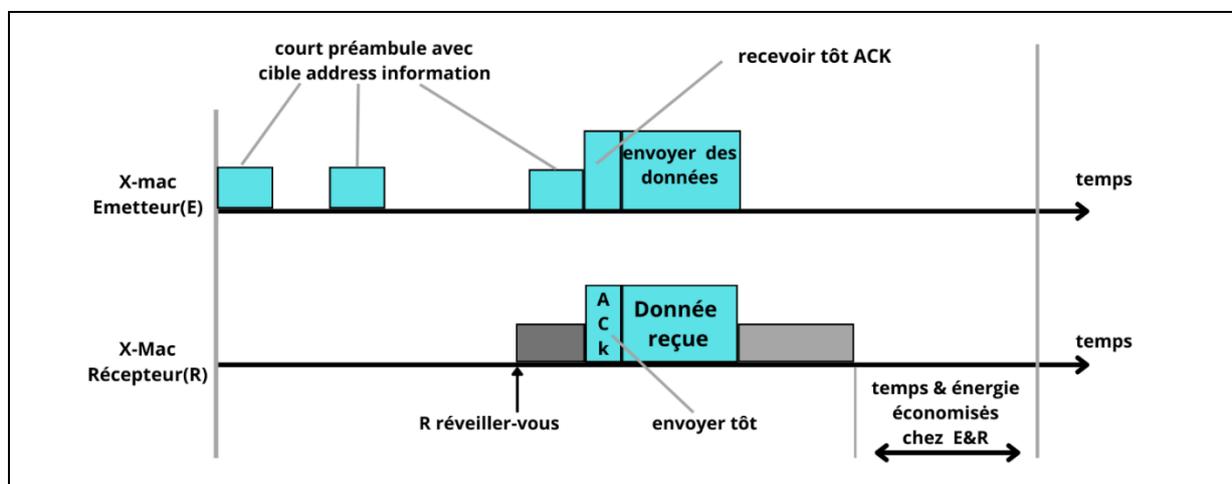


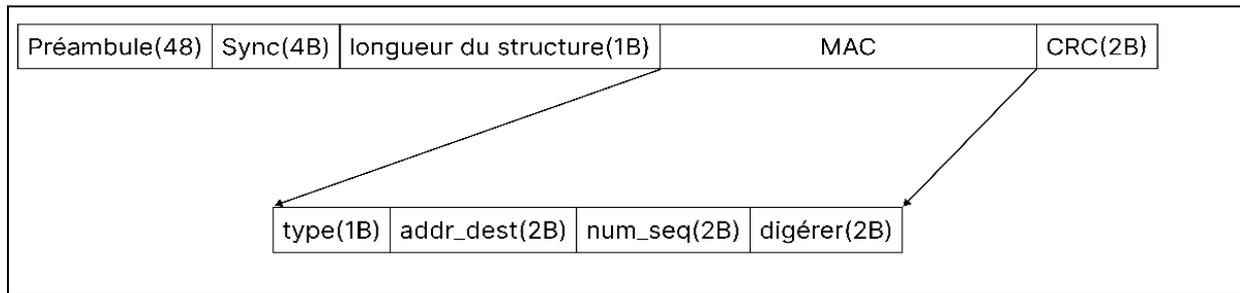
Figure –III.1- Fonctionnement du protocole X-MAC [46].

### III.3.3 Les paquets de contrôle :

#### 1- La structure du paquet « Préambule » :

Dans le protocole d'échantillonnage de préambule de base, le préambule est composé de plusieurs champs tels que la partie contenant des champs MAC. La figure -III.2- montre un exemple de structure de préambule [10].

## Chapitre III : La description du protocole MAC asynchrones simulés



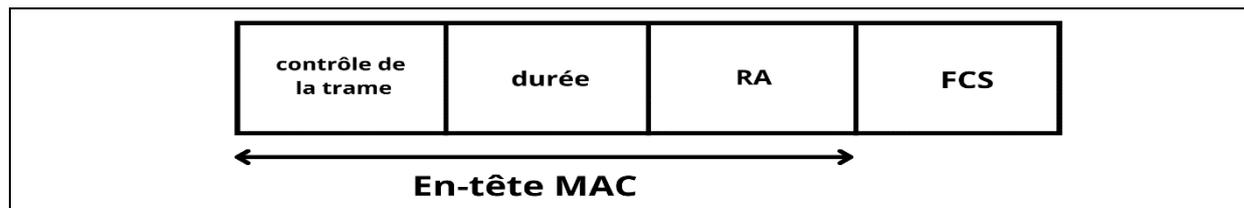
**Figure -III.2- La structure du paquet de préambule [10].**

- 1) Le champ « type » : spécifie le type de la trame en cours de réception. Il est utilisé pour distinguer les différents types de trames, données, préambule, ACK, etc.
- 2) Le champ « addr\_dest (adresse de destination) » : est nécessaire pour le filtrage des trames unicast non pertinentes qui ne sont pas adressées au nœud.
- 3) Le champ d'adresse source (facultatif) : le récepteur utilise ce champ lors de l'envoi des acquittements de la réception d'un court préambule ou d'un paquet de données en mode unicast.
- 4) Le champ « num\_seq (numéro de séquence) » : indique le nombre de trames de préambule qui seront transmises avant la trame de données. Lorsque ce champ est utilisé, le nœud qui se réveille pour échantillonner le canal reçoit une trame de préambule à partir de laquelle il peut déduire quand la trame de données arrivera, donc sur la base de ce dernier il peut éteindre sa radio pendant ce temps pour économiser plus de l'énergie.
- 5) Le champ Digest (digérer) : est utilisé pour permettre à un nœud d'identifier et donc d'éviter de recevoir des trames de diffusion non pertinentes avant leur réception complète.

### 2- La structure du paquet « ACK : ACKnowledgment » :

Une trame d'acquiescement (ACK) se compose de quatre champs d'adresse. Les adresses de destinataires et autres valeurs dans les champs de contrôle des trames d'en-tête couramment référencées incluent comme suit :

- Indique l'irrationalité de la trame d'état DS.
- Autres fragments - Si cette valeur est définie, la trame est fragmentée et il reste encore des fragments à envoyer..
- Retry-Si cette valeur est définie, la tentative avant l'envoi de cette trame a échoué [18].



**Figure –III.3- La structure de la trame de contrôle ACK [10].**

Un ACK est utilisé pour informer l'émetteur (nœud mobile) que le destinataire est prêt à recevoir les données. Les nœuds mobiles sont conscients de la prise en charge ACK lors de l'envoi de données. Si vous ne trouvez pas le signal, suivez les procédures X-MAC standard et insistez sur le fait qu'aucun nœud mobile n'utilise de média. Cependant, si un ACK est détecté, le nœud mobile attend que l'ACK se termine, puis envoie le préambule au nœud statique qui a envoyé le paquet ACK [41].

### III.3.4 Le traitement de la collision et la retransmission :

Afin d'éviter efficacement les collisions, le protocole MAC doit être capable de déterminer avec précision si le canal est libre ou non, ce qui est appelé Clear Channel Assessment (CCA). Étant donné que le bruit ambiant varie en fonction de l'environnement, le X-MAC utilise un logiciel de contrôle automatique du gain pour estimer le bruit de fond. Des échantillons d'intensité du signal sont prélevés lorsque le canal est supposé être inactif, comme après la transmission d'un paquet ou lorsque le chemin de données de la pile radio n'a pas reçu de données valides. Les échantillons sont ensuite placés dans une file d'attente FIFO. La médiane de la cohorte est additionnée à la moyenne mobile pondérée exponentiellement de la décroissance  $\alpha$  [56].

### III.3.5 Fonctionnement du protocole X-MAC :

Figure -III.4- décrit le processus du nœud émetteur et le nœud récepteur et montre en particulier les états et événements possibles provoquant le transit du nœud entre ses états. (Après initialisation dans « INIT », il passe d'abord à l'état « VEILLE »).

- **Pour le nœud émetteur :**

Si la durée de veille est expirée, l'émetteur passe de l'état « VEILLE » à l'état « CCA » pour une écoute périodique du canal, si le canal est libre et la durée d'écoute est expirée, alors il passera à l'état « ENVOIE\_DE\_PREAMBULE » et commence à envoyer des paquets de court préambule, contenant l'adresse du destinataire prévu sinon il retourne à l'état de « VEILLE ». Pendant l'état « ENVOIE\_DE\_PREAMBULE » et après chaque transmission du court préambule, il bascule à l'état « ATTENTE\_D'UN\_ACK » si le délai d'envoi du préambule n'est pas atteint «STOP\_PREAMBULE », sinon il remettra en état de « VEILLE ».



### III.4 Le protocole RI-MAC pour RCSF :

#### III.4.1 Présentation du protocole RI-MAC :

Receiver-Initiated MAC (RIMAC) est un protocole MAC asynchrone à efficacité énergétique qui peut fonctionner sur une large gamme de charges de trafic, appelé Low Power Probing (LPP) [36]. 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 une beacon si le canal est libre, annonçant qu'il est éveillé et prêt à recevoir une trame de données. Un nœud émetteur S en possession des données à envoyer (voir la figure –III.5-), reste actif en silence en attendant l'arrivée d'une balise '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 envoyées, 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'une 'Beacon', le nœud va redormir. 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 par le CCA, il envoie ce type de beacon comme illustré sur la figure –III.6-. Dans cette Beacon, l'émetteur S définit le champ Dst l'adresse du récepteur 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 est générée par le récepteur sur demande de l'émetteur, elle lui permet de transmettre la trame de données en attente immédiatement, plutôt que d'attendre la prochaine émission de Beacon prévue par R [36].

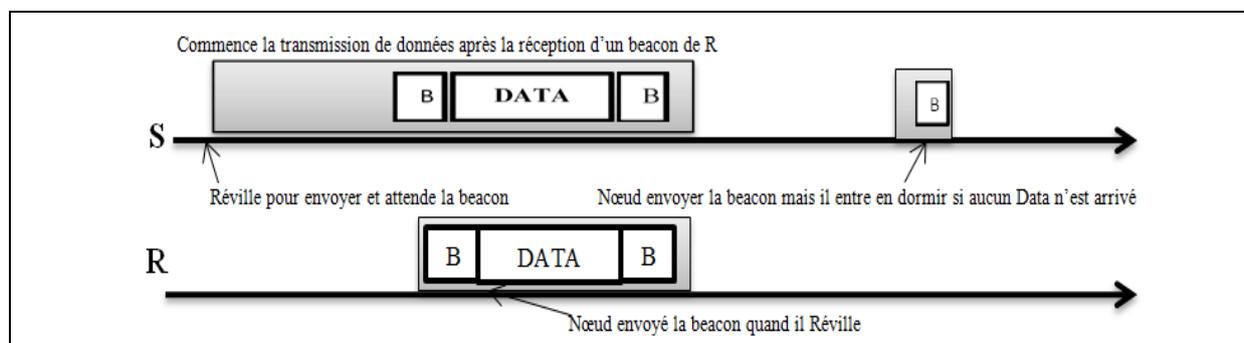
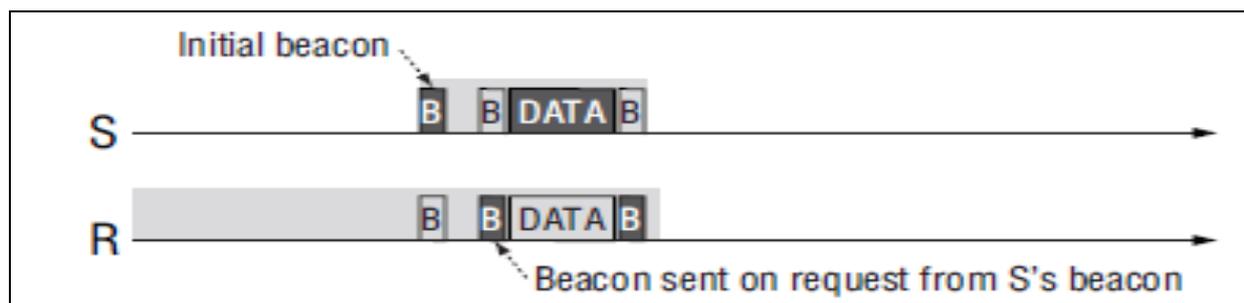


Figure -III.5- Initiation de communication par le récepteur à l'aide de l'envoi de Beacon dans RI-MAC [12].



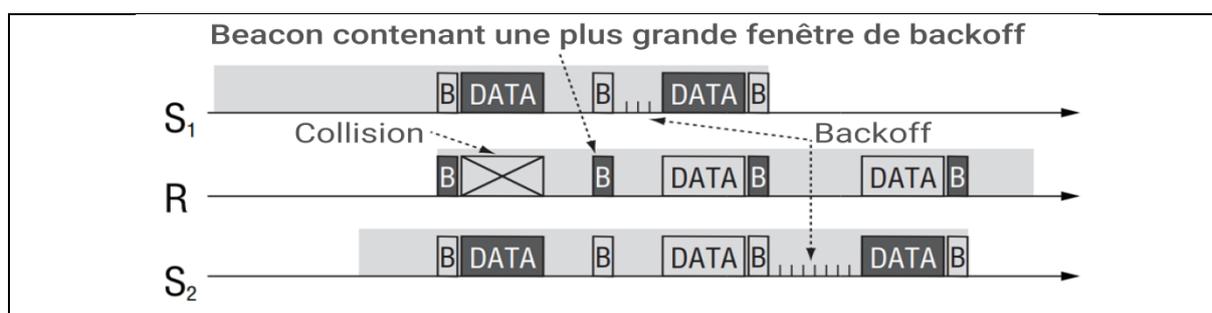
**Figure -III.6- Initiation de communication par l'émetteur à l'aide de l'envoi de Beacon-on-request dans RI-MAC [12].**

### III.4.2 Intérêt de protocole RI-MAC :

Le traitement des transmissions provenant d'un nombre imprévisible d'émetteurs en concurrence pose deux problèmes :

- minimiser le temps actif d'un récepteur pour l'efficacité énergétique.
- minimiser le coût de la détection des collisions et de la récupération des données perdues, que les émetteurs soient ou non cachés les uns des autres.

Pour atteindre ces objectifs dans le RI-MAC, un récepteur utilise des trames de balise pour coordonner les transmissions de trames de données des émetteurs en concurrence, comme le montre la figure -III.7-. Le champ BW d'une balise spécifie la taille de la fenêtre de backoff que les émetteurs doivent utiliser lorsqu'ils se disputent le support. Si une balise reçue ne contient pas de champ BW (c'est-à-dire une balise de base 'beacon'), les émetteurs de ce récepteur doivent commencer à transmettre des données sans se retirer. Si une balise contient un champ BW, chaque émetteur effectue un backoff aléatoire en utilisant le BW comme backoff.



**Figure -III.7- Transmission de trames de données par des expéditeurs en concurrence dans RI-MAC [42].**

« Pour la première balise, le récepteur R demande aux émetteurs (S1 et S2) de commencer à transmettre des données immédiatement après avoir reçu la balise. Si une collision est détectée, R envoie une autre balise avec une valeur BW plus élevée pour demander aux émetteurs d'effectuer un backoff avant leur prochaine tentative de transmission » [3].

### III.4.3 Les paquets de contrôle :

#### 1- La structure du paquet « Beacon » :

Une trame de balise « Beacon » dans RI-MAC contient toujours un champ **Src**, qui est l'adresse du nœud émetteur source de cette dernière. Le format de cette trame de balise « Beacon » dans RI-MAC pour une radio IEEE 802.15.4 est illustré à la Figure -III.8- à titre d'exemple.

- une trame Beacon avec seulement un champ **Src** est appelé une trame beacon de base.
- selon leur rôle, la trame beacon 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 la trame de 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 de la norme IEEE 802.15.4 utilisé pour contrôler le remplissage de tous les champs de la trame beacon.
  - ✓ **Un champ de FCS** (Frame Check Sequence) : représente le mécanisme de détection d'erreurs identiques à celui de la norme IEEE 802.15.4 [3].

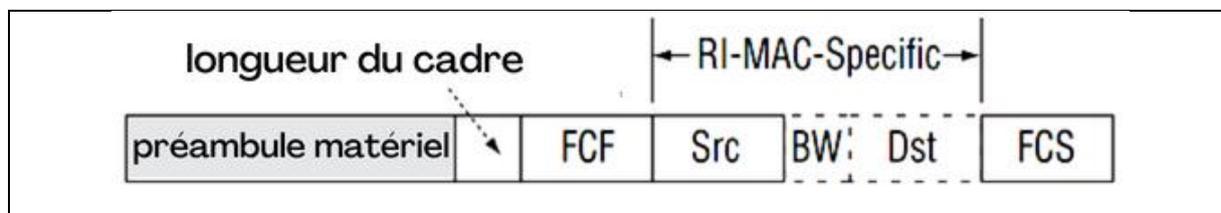


Figure -III.8- Le format d'une trame de balise « Beacon » RI-MAC pour une radio IEEE 802.15.4 [42].

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 appartenant à *S* ignorent le champ de **Dst** dans la beacon et traitent-le comme demande pour le déclenchement d'une nouvelle transmission de données.

### 2- Le double rôle du paquet « Beacon » :

Dans RI-Mac, la balise 'Beacon' joue un double rôle (voir la figure –III.9-) : d'une part elle reconnaît la bonne réception des données précédemment reçues, et d'autre part, elle provoque le début de la prochaine transmission de données vers ce nœud récepteur [3].

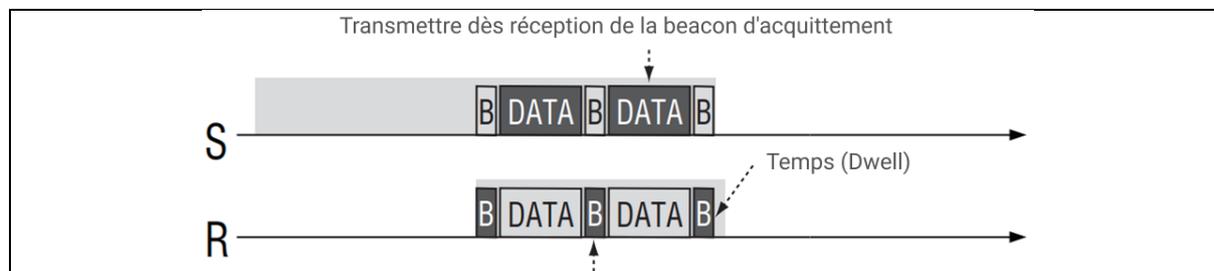


Figure -III.9- Le double rôle d'une balise « Beacon » dans RI-MAC [42].

### III.4.4 Le traitement de la collision et la retransmission :

RI-MAC réduit considérablement le coût de détection des collisions et de récupération des trames de données perdues par rapport à B-MAC et X-MAC. Comme un émetteur ne peut transmettre une trame de données qu'après avoir reçu une balise «'Beacon'», et comme la taille de la fenêtre de backoff est explicitement contrôlée 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 de la balise précédente. Le récepteur n'a qu'à détecter le délimiteur de début de trame (DDF) pour apprendre l'arrivée d'une trame entrante. Si aucun DDF n'est détecté à temps, alors il vérification de la disponibilité du canal par l'utilisation du CCA, puis il décidera qu'il y a eu une collision et générera une autre balise avec une valeur plus grande de BW. Dans le RI-MAC, cette nouvelle balise est transmise après la fin de la plus longue transmission de données possible, afin que les radios de tous les émetteurs soient déjà en mode réception. Avant de transmettre une balise, un nœud effectue un backoff aléatoire pour éviter d'éventuelles collisions répétées avec les balises envoyées 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 certaines stratégies de backoff telle que le binary exponential backoff (BEB) dans IEEE 802,11 et d'autres, selon la densité d'un réseau. Dans RI-MAC, un récepteur joue le rôle principal dans le contrôle de la retransmission en gérant le moment et le nombre de transmissions de balises. Si la valeur BW atteint la taille maximale de la fenêtre de backoff, ou si le récepteur continue à détecter des collisions après un certain nombre de transmissions de balises consécutives, le récepteur se met en veille sans autre tentative. Les émetteurs correspondants sont également impliqués dans le contrôle des

## Chapitre III : La description du protocole MAC asynchrones simulés

---

retransmissions, car un émetteur peut manquer la réception d'une balise en raison de collisions ou de mauvaises conditions de canal. Ainsi, un expéditeur maintient un compte de réessayés pour chaque trame de données 'DATA'. Si aucune balise n'a été reçue du récepteur prévu dans un intervalle de temps 3 fois plus long que l'intervalle de veille, l'émetteur augmente le nombre de tentatives actuelles de 1. De plus, l'émetteur augmente ce nombre de tentatives si aucune balise d'accusé de réception n'est reçue dans la fenêtre de backoff après que l'expéditeur ait transmis une trame DATA après la réception d'une balise. Lorsque le nombre de tentatives atteint une limite prédéfinie, l'expéditeur annule la transmission de la trame de données.

### III.4.5 Fonctionnement du protocole RI-MAC :

Les deux figures-III.10- et -III.11- décrivent le processus du nœud émetteur et le nœud récepteur respectivement et montre en particulier les états et événements possibles provoquant le transit du nœud entre ses états. (Après initialisation dans « INIT », il passe d'abord à l'état « VEILLE »).

**Premièrement** : la transmission de données initiée par le récepteur.

- ***Pour le nœud émetteur :***

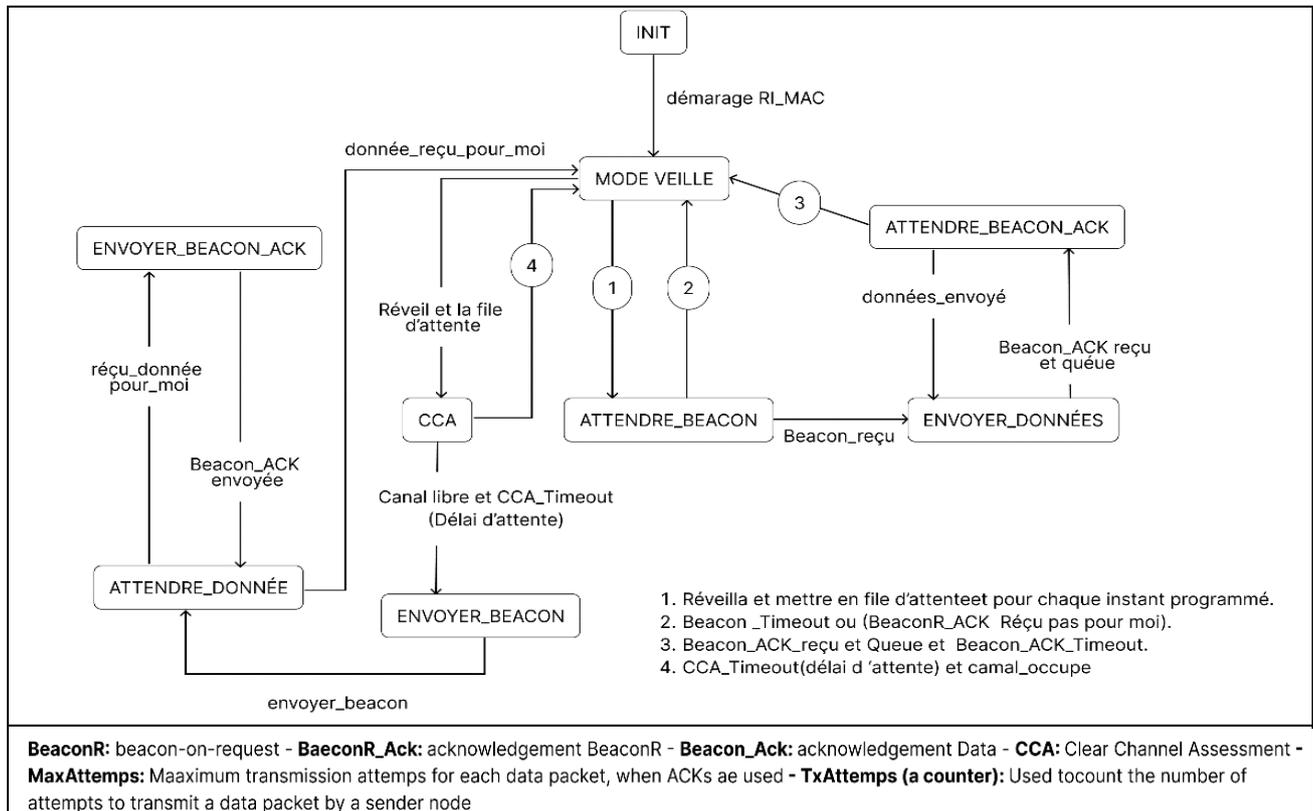
Si la durée de veille est expirée, l'émetteur passe de l'état « VEILLE » à l'état « ATTENDRE\_BEACON » pour une écoute périodique du canal, si aucune communication n'est détectée pendant la durée d'écoute, il retourne à l'état « VEILLE » sinon s'il reçoit une balise de 'Beacon', il se bascule vers l'état « ENVOYER\_DONNEES ». Une fois que l'émetteur envoie le paquet de données 'DATA' au nœud récepteur après l'expiration du back off, il passe automatiquement à l'état « ATTENDRE\_BEACON\_ACK ». Enfin, si (le nœud reçoit un 'Beacon\_Ack' et la file d'attente n'est pas vide) ou (le délai d'attendre un 'Beacon\_Ack\_timeout' est atteint et (TxAttempts <= MaxAttempts) et le canal est libre), alors il passe à l'état « ENVOYER\_DONNEES »; sinon, si ('Beacon\_Ack\_timeout' est atteint et (TxAttempts > MaxAttempts)) ou (le nœud reçoit un 'Beacon\_Ack' et file d'attente vide), puis il revient à l'état « VEILLE » [11].

- ***Pour le nœud récepteur :***

Le nœud se réveille pour détecter le canal pour une écoute périodique en passant de l'état « VEILLE » à l'état « CCA ». Si aucune communication n'est détectée pendant « CCA » (le délai CCA\_Timeout est atteint), il passe à l'état « ENVOYER\_BEACON » afin de diffuser une balise à ses nœuds émetteurs voisins et il passe à l'état « ATTENDRE\_DONNEES »; sinon, il revient à l'état « VEILLE ». Pendant l'état « ATTENDRE\_DONNEES », si le nœud

## Chapitre III : La description du protocole MAC asynchrones simulés

reçoit un paquet des données du nœud émetteur correspondant, il passe à l'état « ENVOYER\_BEACON\_ACK » ; sinon, si le délai d'attendre du données est atteint, il revient à l'état « VEILLE ». Enfin, une fois que le nœud envoie 'Beacon\_Ack' au nœud émetteur, il revient immédiatement à l'état « ATTENDRE\_DONNEES » [11].



**Figure –III.10- Machine à états finis du fonctionnement du protocole RI-MAC (cas : d'un nœud émetteur) [11].**

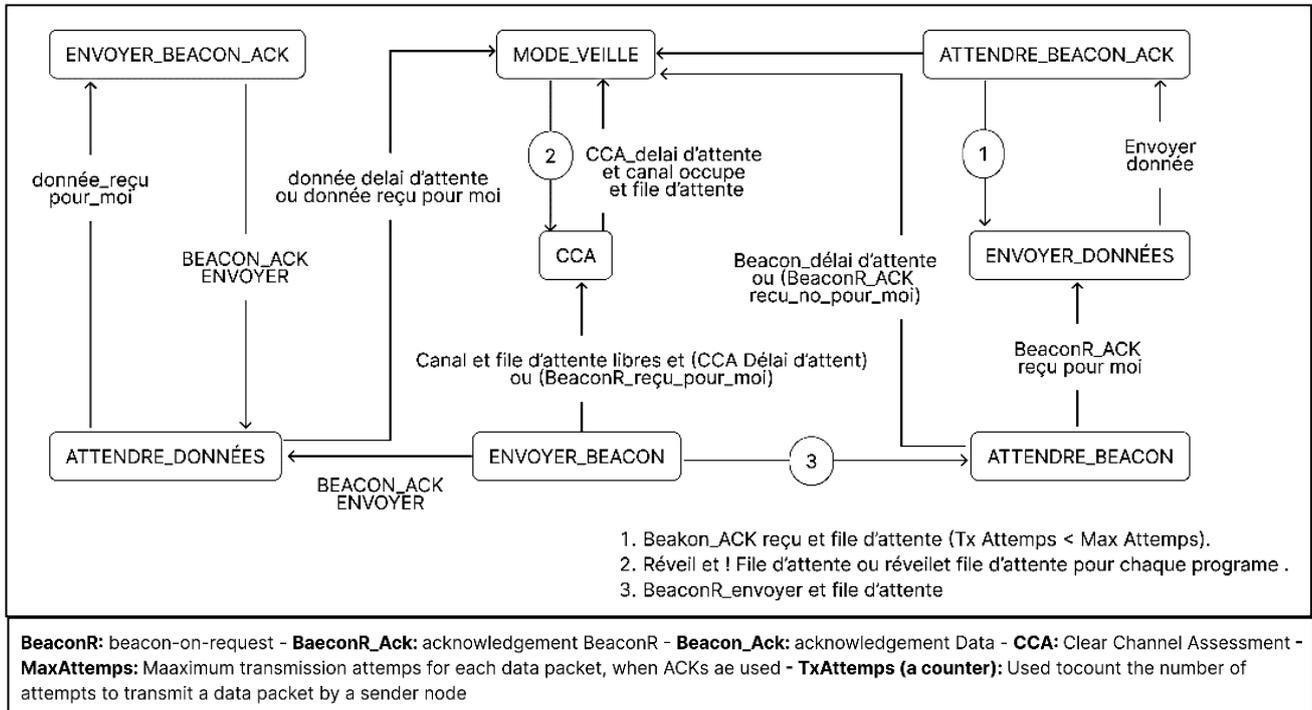
**Deuxièmement :** La transmission de données initiée par l'émetteur

▪ **Pour le nœud émetteur :**

Ce dernier passera d'abord à l'état « CCA » depuis l'état de « VEILLE », si aucune communication n'est détectée pendant « CCA » (le délai CCA\_Timeout est atteint), il passe à l'état « ENVOYER\_BEACON » et il commence l'envoi d'un 'Beacon-on-request ' contenant l'adresse du récepteur prévu puis il passe à l'état ATTENDRE\_BEACON » ; sinon, il revient à l'état de « VEILLE ». Il passera à l'état « ENVOYER\_DONNEES » après avoir reçu une balise ACK 'Beacon\_Ack' du récepteur correspondant. Une fois qu'il envoie le paquet de données 'DATA' au nœud récepteur si le canal est libre, il passe automatiquement à l'état « WAIT\_BEACON\_ACK ». Enfin, pendant « ATTENDRE\_BEACON\_ACK » si (le nœud reçoit un 'Beacon\_Ack 'et sa file d'attente n'est pas vide) ou (BEACON\_Ack\_timeout est

## Chapitre III : La description du protocole MAC asynchrones simulés

atteint et ( $TxAttempts < MaxAttempts$ ) et le canal est libre), alors il passe à l'état « ENVOYER\_DONNEES » ; sinon, si ( $BEACON\_Ack\_timeout$  est atteint et ( $TxAttempts > MaxAttempts$ )) ou (le nœud reçoit un 'Beacon\_Ack' et sa file d'attente vide), alors il repasse à l'état « VEILLE » [11].



**Figure –III.11- Machine à états finis du fonctionnement du protocole RI-MAC (cas : d'un nœud récepteur) [11].**

### ▪ Pour le nœud récepteur :

Le nœud se réveille pour détecter le canal pour une écoute périodique en passant de l'état « VEILLE » à l'état « CCA ». S'il reçoit un 'Beacon-on-request' contenant son adresse de ses voisins émetteurs pendant CCA, il passe à l'état « ENVOYER\_BEACON » pour envoyer 'Beacon\_Ack' au nœud émetteur correspondant et passe automatiquement en « ATTENDRE\_DONNEES » ; sinon, il revient à l'état de « VEILLE ». Si aucun paquet de données n'est reçu du nœud émetteur correspondant pendant « ATTENDRE\_DONNEES », le nœud passe immédiatement à l'état de « VEILLE » ; sinon, il revient à l'état « ENVOYER\_BEACON\_ACK ». Une fois que le récepteur envoie un 'Beacon\_Ack' au nœud émetteur, il passe automatiquement à l'état de « VEILLE » immédiatement [11].

### III.5 Conclusion :

Les RCSF attirent beaucoup de chercheurs en raison de leurs applications réellement utiles dans presque tous les domaines. Ainsi, que la conception d'un protocole MAC susceptible d'améliorer l'efficacité énergétique et de prolonger la durée de vie du RCSF est un

### **Chapitre III : La description du protocole MAC asynchrones simulés**

---

problème complexe. De ce fait, il est important d'étudier le fonctionnement des différents protocoles MAC existants. Dans ce chapitre nous avons présenté une étude détaillée des deux protocoles MAC asynchrones X-MAC et RI-MAC dont leur simulation et évaluation seront détaillées dans le chapitre suivant.

# ***Chapitre IV***

***« Simulation et comparaison »***

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

---

### IV.1 Introduction :

Après avoir présenté un état de l'art des différents types de protocoles MAC proposés pour les RCSF dans le troisième chapitre, nous passons maintenant à la partie simulation dans le but d'extraire les différentes données (résultats) nécessaires à la comparaison.

Au cours du processus de développement de protocoles de communication dans tout type de réseau, la simulation est une étape essentielle du processus, permettant la planification future, le suivi des décisions et l'amélioration continue des opérations, etc. Pour mener à bien ce travail, nous étudions les performances des protocoles MAC asynchrones soumis au RCSF à l'aide du simulateur COOJA, car il a besoin de comprendre le comportement des protocoles que nous simulons, puis nous analysons les résultats et faisons une comparaison entre ces protocoles. Cette comparaison est basée sur plusieurs métriques spécifiques telles que le taux de livraison des paquets, la tance moyenne et la consommation d'énergie moyenne du réseau, qui peuvent montrer quel protocole MAC est optimal dans RCSF. Dans ce chapitre nous présentons d'abord l'environnement de simulation et comment y travailler, puis nous exposons la comparaison faite entre les deux protocoles MAC asynchrones (X-MAC et RI-MAC) étudiés et simulés sur la base des résultats de la simulation obtenus. Finalement, nous présentons quelques conclusions.

### IV.2 Aperçu sur le système d'exploitation Contiki :

Contiki est un système open source, léger, flexible et polyvalent qui repose sur un modèle d'exploitation hybride [3]. Le système a été développé par ADAM Dunkels à l'Institut suédois d'informatique en 2002 par un groupe de développeurs issus de l'industrie et du milieu universitaire. Conçu pour être intégré dans de minuscules capteurs qui ont généralement des ressources limitées, Contiki a eu l'idée d'utiliser les communications IP à faible consommation d'énergie - les réseaux de capteurs de puissance. En outre, il prend en charge les protocoles IPV6 et 6LOWPAN, qui sont particulièrement utiles pour les nœuds communique en IPV6 et utilise la norme 802.15.4 définie par l'IEEE. Contiki contient deux piles de communication : uIP et Rime [1].

- uIP est une petite pile TCP/IP RFC-CONFORME qui permet à Contiki de communiquer sur Internet.
- Rime est une pile de communication légère conçue pour les radios à faible puissance. Il fournit des communications brutes étendues.

La programmation d'applications dans ce système d'exploitation est en langage C et autoriser la concurrence, Contiki utilise des protothreads créés des fils légers et sans pile conçus pour très peu d'environnements mémoire, tels que les réseaux de capteurs.

### IV.3 Environnement de simulation Cooja :

Cooja [15] est un simulateur inclus dans le système (OS) CONTIKI. Il permet de simuler les réseaux de capteurs. Grâce à ce simulateur, on peut tester rapidement du code écrit en C sans flasher un vrai capteur. Nous pouvons répartir n'importe quel nombre de nœuds sur une zone donnée. Nous visualisons alors la topologie du réseau en temps réel (ou en accéléré). Nous présentons ci-après les différentes étapes de création utilisées pour la simulation :

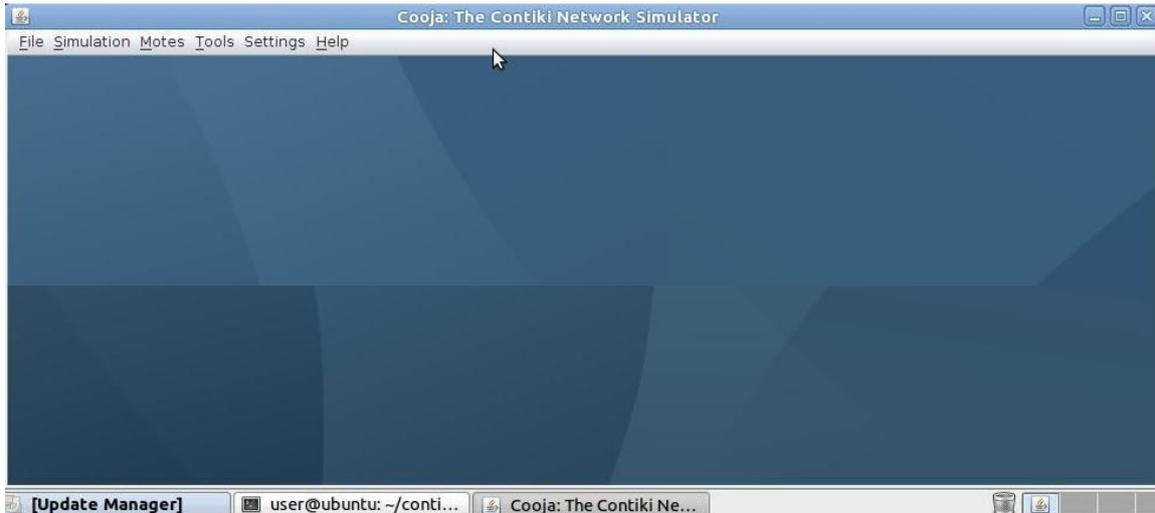


Figure –IV.1- L’interface principale du simulateur Cooja.

- Dans notre travail avant de commencer la simulation, on choisit le fichier Contiki, plate-forme, Sky puis Contiki-conf.h afin d'ajouter le protocole sur lequel nous travaillons. par exemple l’ajout du protocole X-MAC est indiqué dans la figure –IV.2- suivante :

```
contiki-conf.h
/* -*- C -*- */

#ifndef CONTIKI_CONF_H
#define CONTIKI_CONF_H

#ifdef PLATFORM_CONF_H
#include PLATFORM_CONF_H
#else
#include "platform-conf.h"
#endif /* PLATFORM_CONF_H */

#ifndef NETSTACK_CONF_MAC
#define NETSTACK_CONF_MAC    csma_driver
#endif /* NETSTACK_CONF_MAC */

#ifndef NETSTACK_CONF_RDC
#define NETSTACK_CONF_RDC    xmac_driver
#endif /* NETSTACK_CONF_RDC */

#ifndef NETSTACK_CONF_RDC_CHANNEL_CHECK_RATE
#define NETSTACK_CONF_RDC_CHANNEL_CHECK_RATE 8
#endif /* NETSTACK_CONF_RDC_CHANNEL_CHECK_RATE */

C/C++/ObjC Header Tab Width: 8 Ln 17, Col 31 INS
```

Figure -IV.2- Exemple de fichier de configuration (contiki-conf.h).

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

- Pour créer une nouvelle simulation, cliquez sur Fichier dans la barre de menus, Nouvelle simulation, vous obtiendrez une boîte de dialogue qui vous demandera d'entrer de nombreux paramètres avancés de la nouvelle simulation, comme le montre la figure -IV.3-

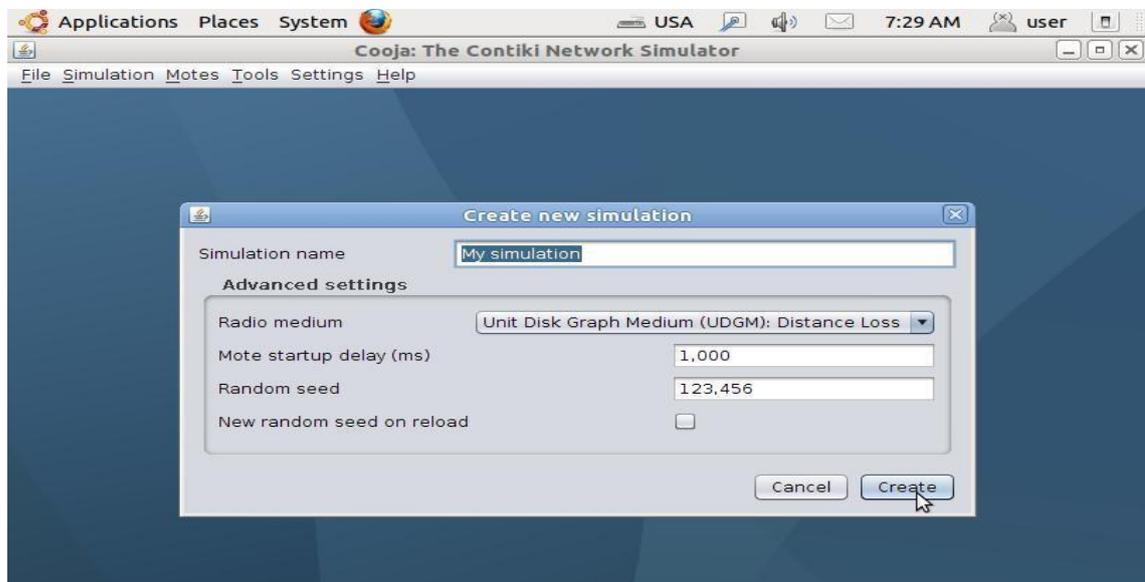


Figure -IV.3- La création d'une nouvelle simulation.

- Pour créer un nouveau réseau à simuler et entrer d'autres paramètres pour la simulation, il faut ensuite cliquer sur le bouton 'Create'. vous obtiendrez une interface composée de plusieurs parties différentes (telles que : le déploiement de réseau, le lancement de la simulation, la visualisation des résultats, etc.) comme le montre la figure -IV.4-

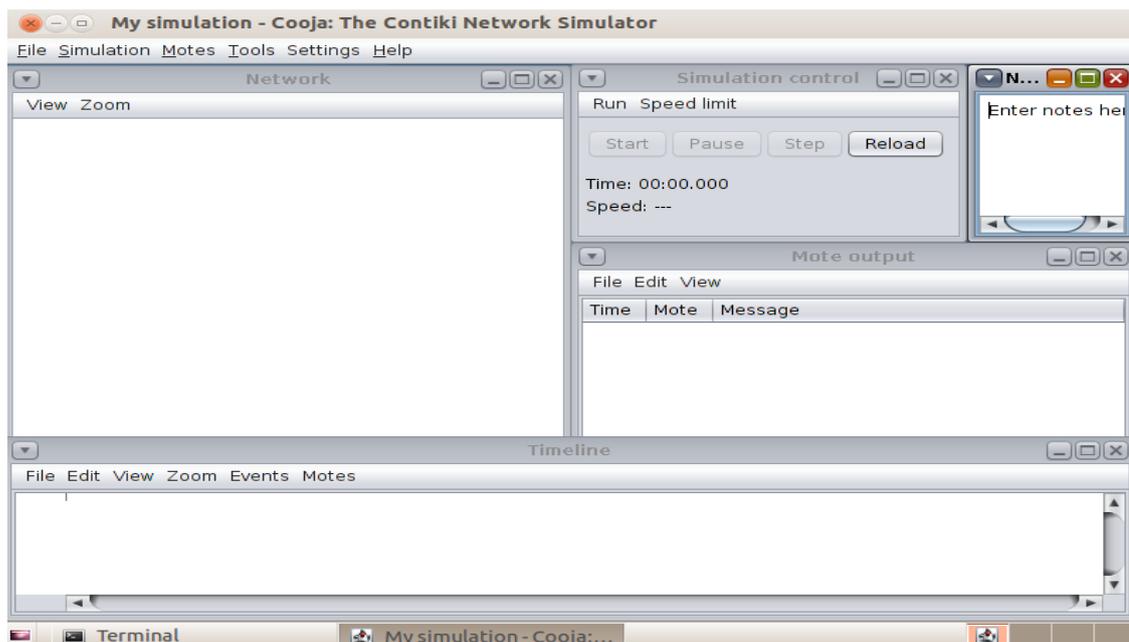


Figure -IV.4- La fenêtre initiale de lancement de simulation du simulateur Cooja.

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

- Afin de pouvoir déployer les différents nœuds (Motes) utilisés par le RCSF à simuler dans Cooja, vous cliquez d'abord dans la barre de menu sur « Motes », ensuite sur « Add Motes → create new mote type » et à la fin vous sélectionnez Sky Mote à partir du menu affiché, comme le montre la Figure -IV.5-.

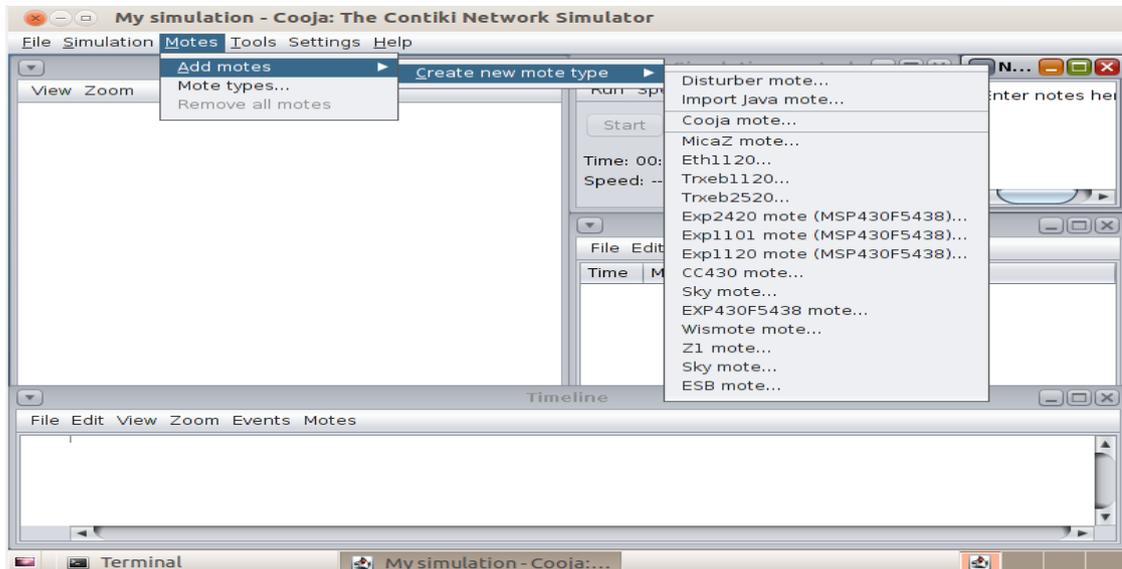


Figure -IV.5- La sélection du type de Mote « Sky Mote ».

- La « Sky Mote » est la plus simple forme des « Motes » (des nœuds) à utiliser par un RCSF et l'idéal pour les configurations initiales, elle est déjà prédéfinie dans le simulateur Cooja. La figure suivante montre un exemple de la création d'une « Sky Mote ».

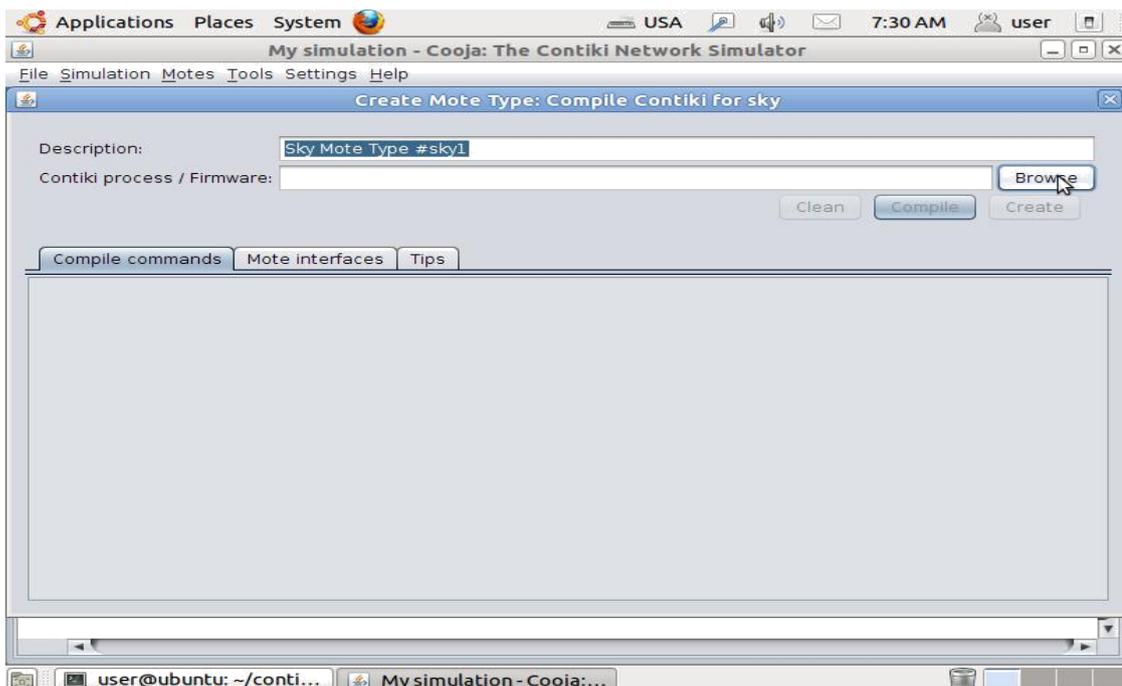
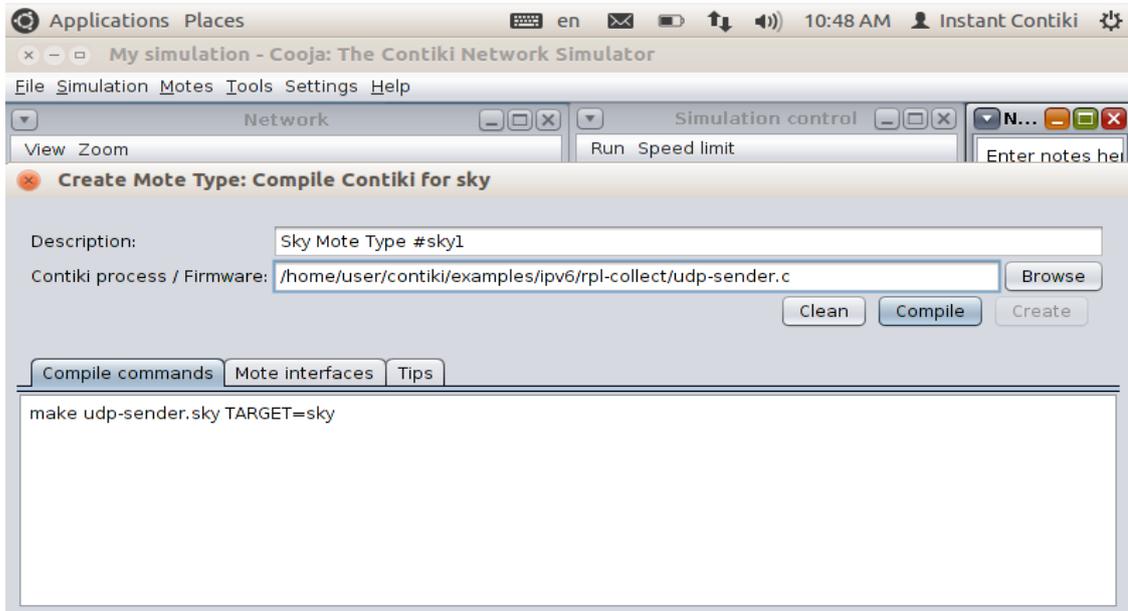


Figure -IV.6- La création d'une « Sky Mote ».

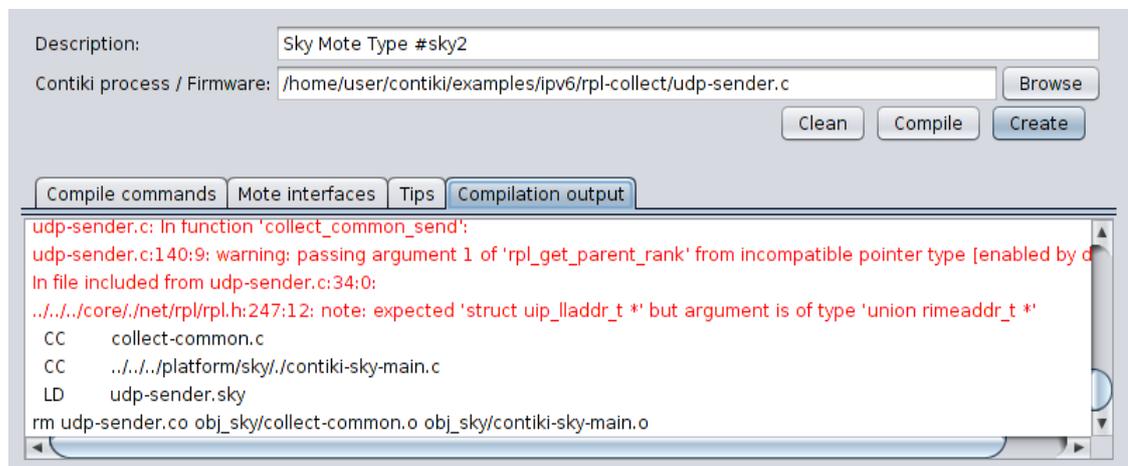
## Chapitre IV : Simulation et comparaison

- Afin de charger le fichier du code d'implémentation actuelle d'un protocole à simuler, vous pouvez accéder directement au dossier (répertoire) des exemples du simulateur Cooja qui contient le firmware avec plusieurs options déjà disponible. La figure –IV.7- montre le chargement du fichier du code d'implémentation du protocole X-MAC à simuler.



**Figure -IV.7- Le chargement le fichier du code d'implémentation du protocole X-MAC dans Cooja**

- Après le chargement du fichier du code d'implémentation du protocole MAC à simuler, en passe à la phase de la compilation où on commence par effacer toute compilation précédente de la « Mote » (On clique sur Clean (Nettoyer)). Le résultat de la compilation de ce fichier d'implémentation utilisé par une « Mote » est un code d'avertissement en rouge. Si ce dernier ne contient pas d'erreurs alors le fichier est compilé avec succès.



**Figure -IV.8- Compilation du code d'implémentation d'une « Mote » Cooja.**

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

- Afin d'introduire le nombre de « Motes » appartenant au RCSF qui sera créé avant la simulation, cliquez sur le bouton « Create ». La figure -IV.9- montre la boîte de dialogue permettant de saisir le nombre de nouvelles « motes » ainsi que l'intervalle de leurs positions.

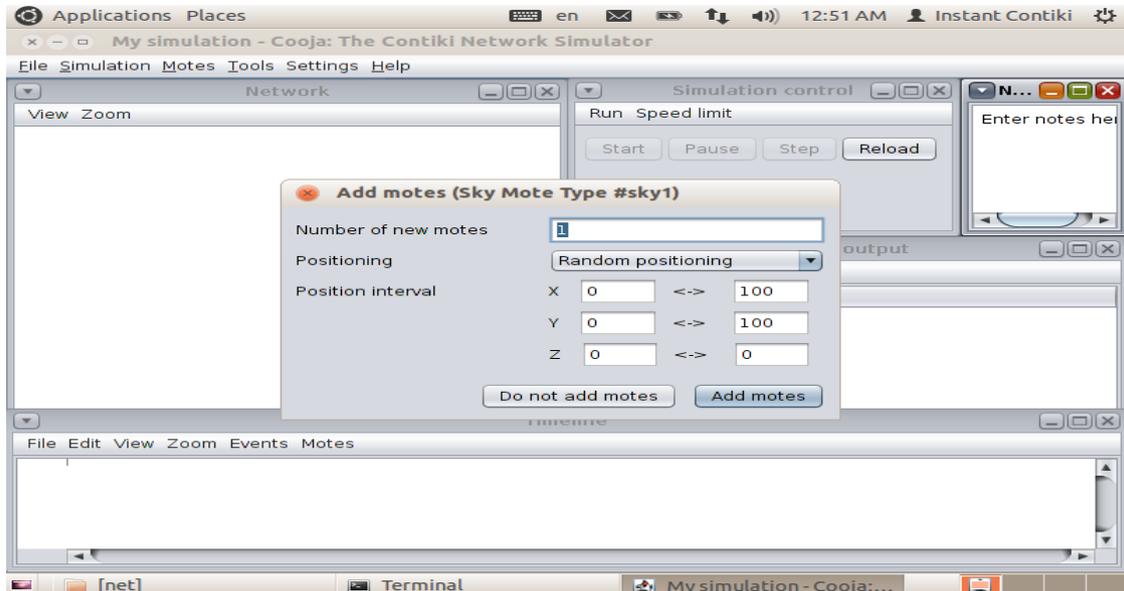


Figure -IV.9- L'ajout des « Motes » dans Cooja.

- Afin d'afficher le RCSF qui sera créé sur une zone déjà définie, vous cliquez sur le bouton « Add notes », une interface similaire à celui de la Figure -IV.10- est affichée montrant le déploiement des « Motes » du ce RCSF.

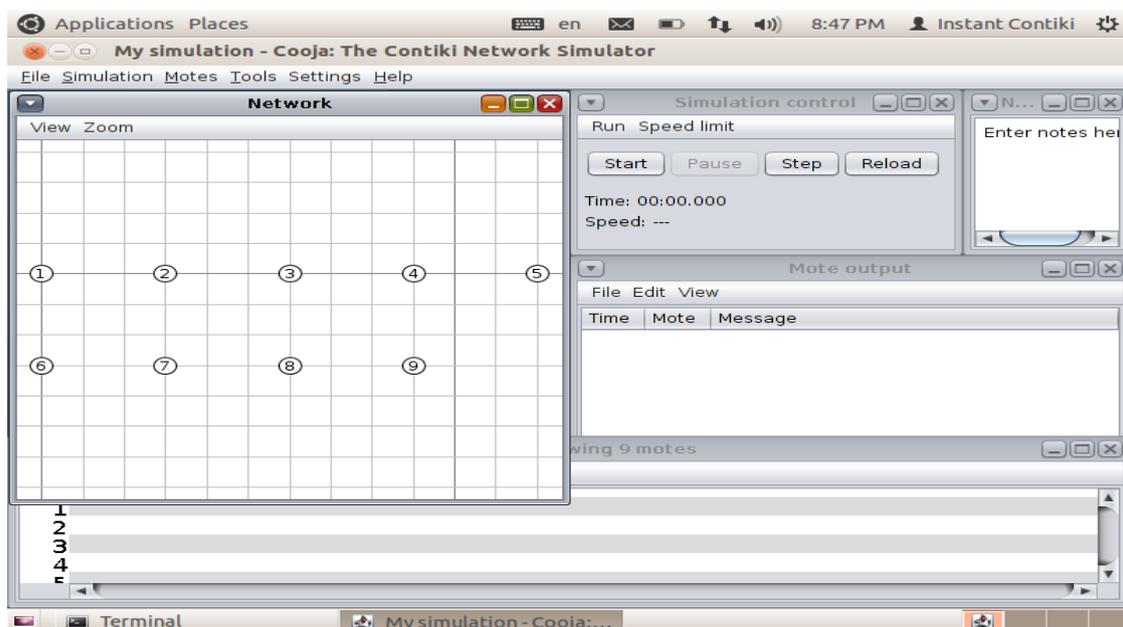


Figure -IV.10- La déploiement des « Motes » d'un RCSF dans Cooja.

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

- Étant donné que Mote Sink est uniquement requis, cliquez sur ajouter une « mote », une fenêtre de sélection de dossier d'exemple apparaîtra, avec de plusieurs options, puis cliquez sur Nettoyer (Clean), puis compilez, comme il est illustré sur la figure suivante :

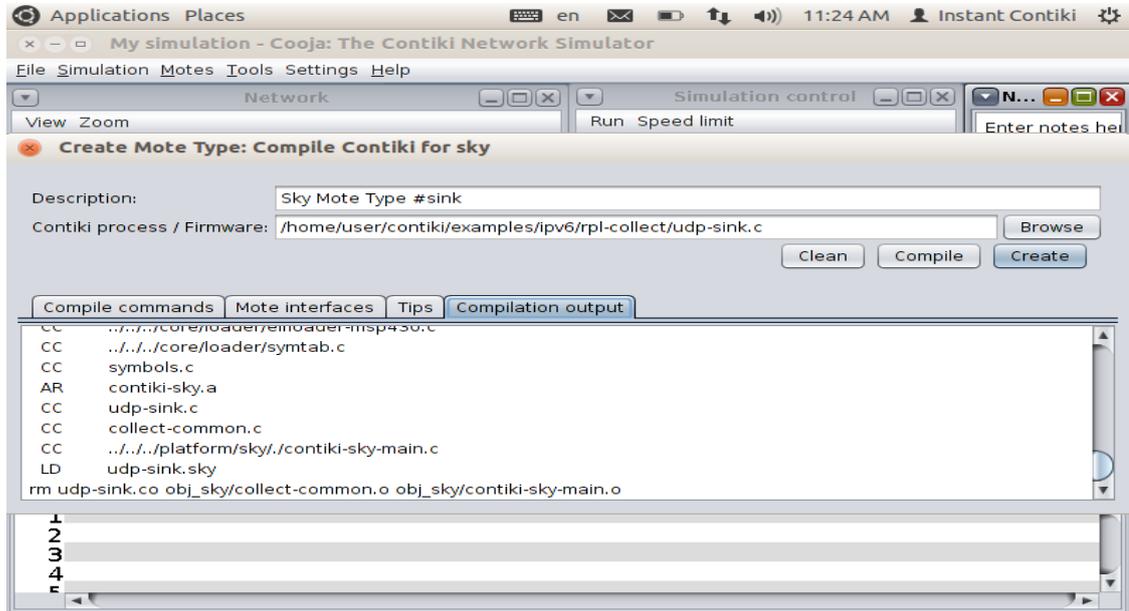


Figure -IV.11- Compilation du code d'implémentation correspond au « Mote Sink ».

- Afin d'ajouter le nombre de Sink à utiliser par le RCSF, vous cliquez sur « Add notes », comme il est illustré sur la figure suivante :

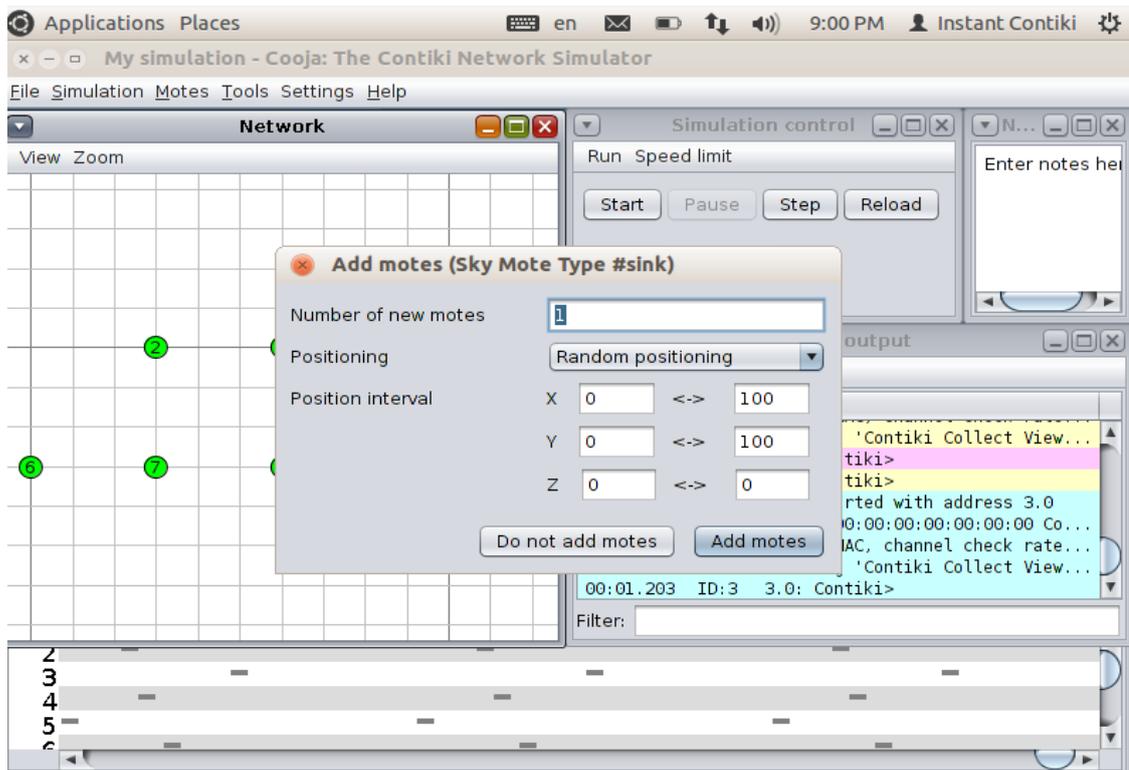


Figure -IV.12- L'ajout des « Motes » de type Sink dans Cooja.

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

- Enfin, pour démarrer la simulation selon le simulateur Cooja sous le système Contiki, cliquez sur le bouton « Start » (voir la figure -IV.13-). Au cours de cette simulation, la communication entre les nœuds du RCSF et tous les paramètres d'un nœud capteur sont affichés dans des différentes fenêtres.

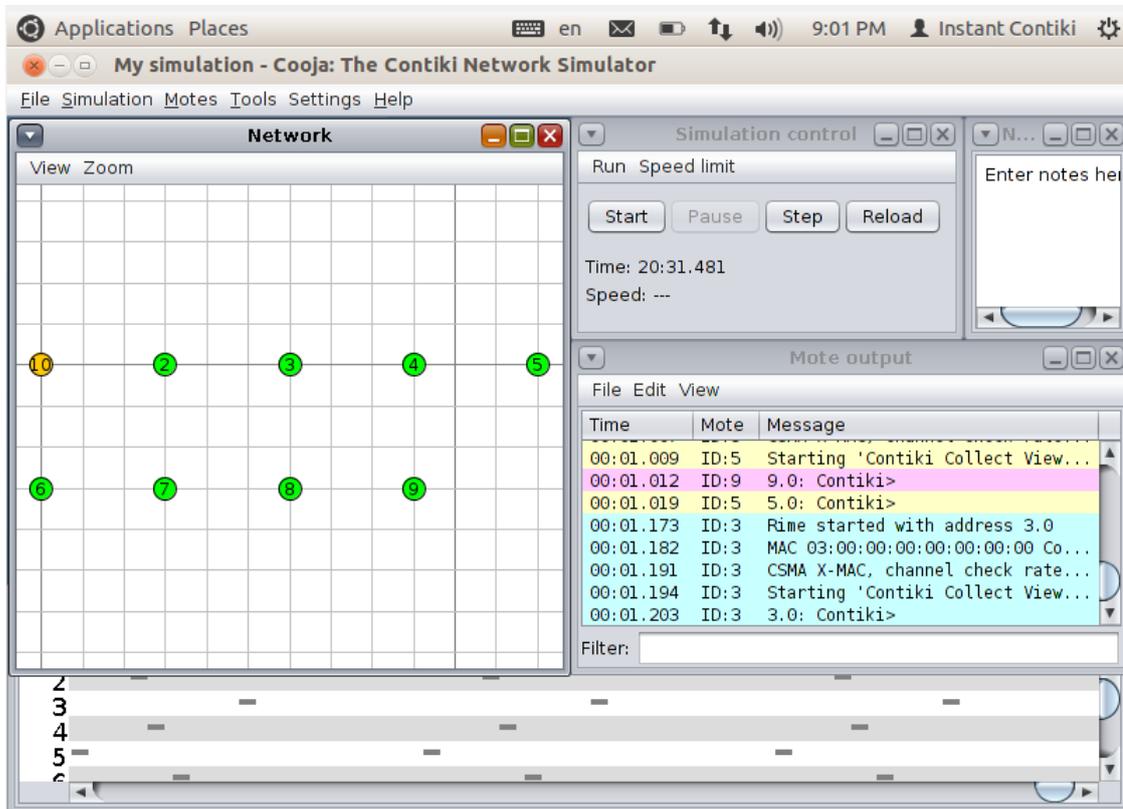


Figure -IV.13- Le démarrage d'une simulation dans le simulateur Cooja.

- ✓ **La description des lignes de la fenêtre « Mote output » :**
  - La première ligne : affiche l'adresse de Rime d'un nœud (d'une « mote »).
  - La deuxième ligne : affiche l'adresse MAC du nœud ainsi que son identifiant (ID).
  - La troisième ligne : affiche le mécanisme X-MAC. La couche MAC est chargée d'éviter les collisions au moyen de la radio et de retransmettre les paquets en cas de collision. Contiki fournit deux mécanismes d'évitement de collision à utiliser dans la couche MAC : un mécanisme CSMA (Carrier Sense Multiple Access) et un mécanisme NullMAC. Dans nos simulations effectuées nous avons utilisé le mécanisme CSMA et un taux de contrôle du canal de 8 hz, ainsi qu'un canal radio 65491.
  - La quatrième ligne : indique le nom du processus exécuté.

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

### IV.4 Les métriques d'évaluation :

#### IV.4.1 La consommation moyenne d'énergie :

La consommation énergétique moyenne (notée  $E_m$ ) du réseau est le rapport entre la somme moyenne d'énergie consommée par chaque nœud (noté  $E_n$ ) et le nombre total de nœuds de réseau (noté  $N_p$ ). Pour notre cas elle est calculée en pourcentage, la formule est la suivante [2] :

$$E_m = \frac{1}{N_p} \times \sum_{x=1}^{N_p} E_n \longrightarrow (1)$$

#### IV.4.2 Latence moyenne des paquets :

La latence moyenne des paquets envoyés (notée  $L_m$ ) représente le temps moyen entre la date à laquelle le paquet a été généré par la source et la date à laquelle il a été reçu avec succès par le puits (Sink). Notez que les principales raisons du retard des paquets sont : le délai de propagation (très faible), le délai de transmission, le délai de traitement et le délai passé dans les files d'attente [2]. Pour calculer la durée (en ms) du retard moyen dans le réseau, nous utilisons la formule suivante :

$$L_m = \frac{1}{N_p} \times \sum_{x=1}^{N_p} T_m \longrightarrow (2)$$

$T_m$  : temps de la latence moyenne d'un nœud

$N_p$  : nombre total des nœuds du réseau.

#### IV.4.3 Taux de livraison des paquets :

Le taux de livraison de paquets de données (noté  $T_p$ ), égale au nombre de paquets reçus avec succès par le nœud de destination (noté  $P_r$ ), divisé par le nombre de paquets envoyés par les nœuds sources (noté  $N_r$ ) [2]. Le calcul se fait selon la formule suivante :

$$T_p = \frac{P_r}{N_r} \longrightarrow (3)$$

### IV.5 Les paramètres de simulation :

Afin de mettre en œuvre nos expériences, nous avons utilisé le système d'exploitation CONTIKI OS et le simulateur Cooja, il s'agit d'exécuter des tests sur les protocoles de sous-couche MAC de RCSF. Certains paramètres sont introduits dans le fichier dont l'extension CSC.

#### IV.5.1 Le type de réseau utilisé et leur topologie :

Les RCSF peuvent être classés en deux grandes catégories de base : un RCSF mobile formé d'un ensemble de nœuds capteur mobiles se déplaçant dans un environnement statique

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

et un RCSF stationnaire est formé d'un ensemble de nœuds capteur stationnaires utilisés pour surveiller l'apparition d'évènements sur une zone géographique. L'objectif principal de ce type de réseau est seulement la surveillance. Lors de la création nos simulations, on a utilisé un réseau stationnaire avec une topologie en grille et des déploiements spécifiques, tel qu'illustré à la Figure –IV.14-.

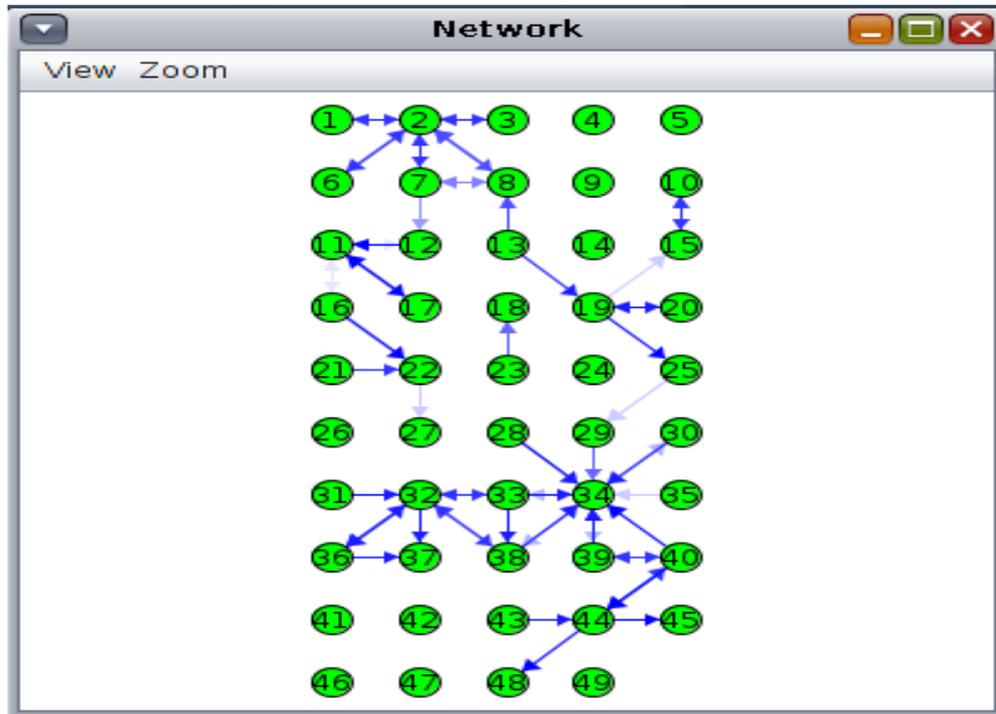


Figure –IV.14 - Le type de Topologie du réseau utilisé.

### IV.5.2 Les valeurs des paramètres de simulation :

Les principaux paramètres de simulation sont spécifiés dans un fichier avec une extension CSC et sont résumés dans le tableau ci-dessous :

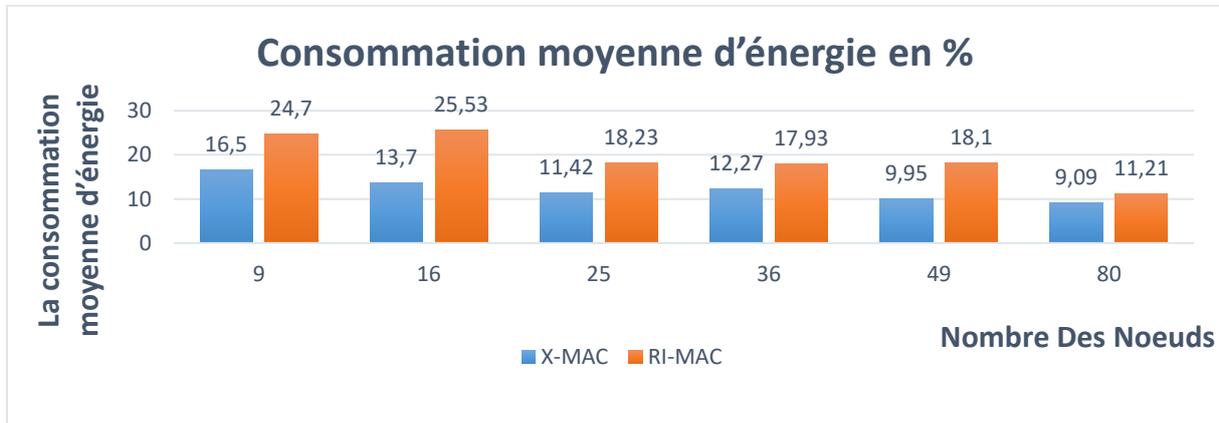
Paramètre	Valeur
Système d'exploitation	Contiki 2.7
Nombre de Nœuds	9, 16, 25, 36, 49, 80
Le nœud puits (sink)	8, 15, 24, 35, 48, 79
Le type de nœuds	Sky mote
La topologie du RCSF	Grille
Le type de MAC	RI-MAC, X-MAC
Nombre des paquets par chaque nœud dans le RCSF	100
Taille du playground (x,y,z)	(200m, 200m, 200m)
La portée de transmission	50 m
La distance entre les nœuds	40m

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

**Tableau -IV.1- Les paramètres de simulation.**

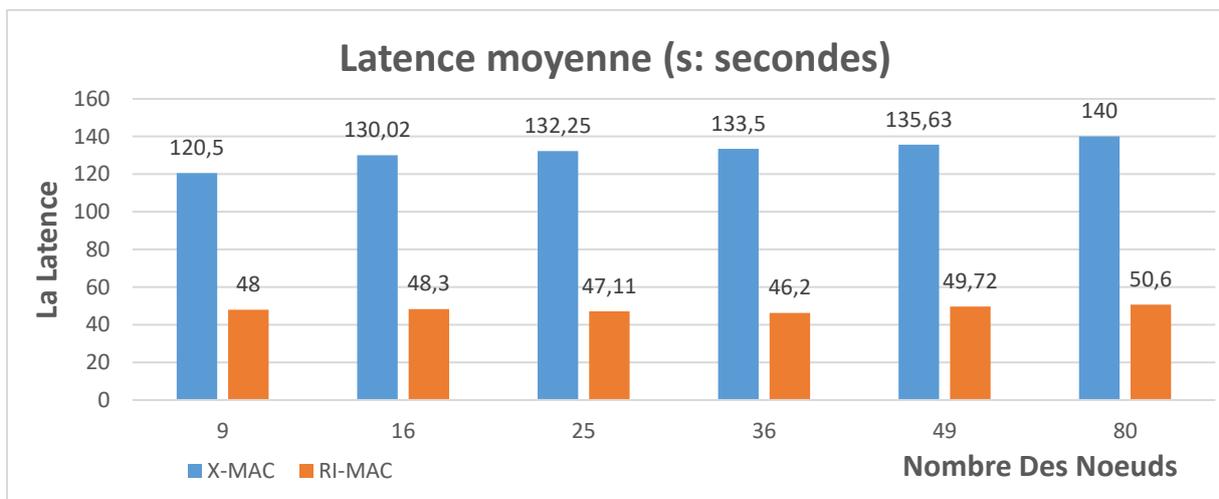
### IV.6 L'évaluation des performances (comparaison) :

Dans cette partie nous présentons les résultats de nos simulations afin d'évaluer les protocoles MAC asynchrones simulé (X-MAC et RI-MAC), à travers les trois métriques présentées dans la section IV.4 de ce chapitre :



**Figure -IV.15- La consommation moyenne d'énergie en pourcentage.**

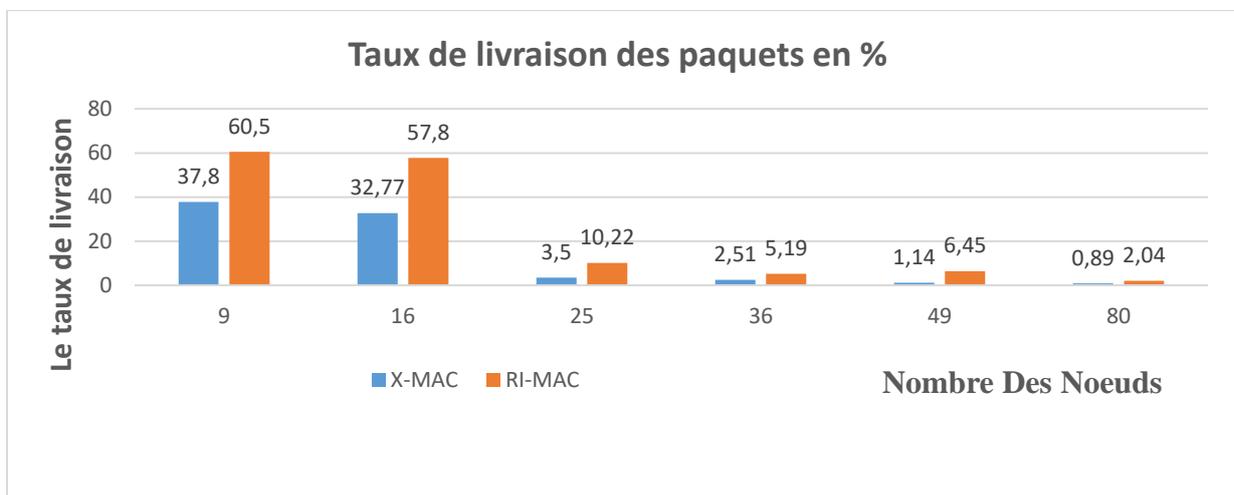
A partir des résultats illustrés sur la figure -IV.15-, nous remarquons que le protocole X-MAC est moins gourmand en consommation d'énergie que son homologue RI-MAC. Par exemple, dans le cas où le nombre des nœuds égale à 9, nous avons trouvé 16,5% comme taux d'énergie moyenne consommée par ces nœuds avec le protocole X-MAC et 24,7% avec le protocole RI-MAC et dans le cas où le nombre de nœuds égale à 49, on remarque aussi que le rapport de l'énergie moyenne consommée avec le protocole X-MAC atteint 9,95% et avec le protocole RI-MAC atteint 18,1%. De ce fait, on peut conclure que le protocole X-MAC surpasse le protocole RI-MAC en termes de conservation d'énergie et cela est dû au taux de livraison élevé des paquets dans ce cas.



**Figure -IV.16- La latence moyenne.**

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

Les résultats illustrés sur la figure -IV.16-, montrent que le protocole RI-MAC surpasse considérablement le protocole X-MAC. Il est considérable que la latence moyenne de RI-MAC est inférieure à celle de X-MAC. Cette faible latence moyenne est principalement due à : dans RI-MAC, l'émetteur écoute le canal pour une balise dans chaque transmission de paquet qui ne sature pas le canal. Inversement, la transmission de plusieurs courts préambules dans X-MAC qui provoque des saturations de support et des pertes de paquets dues à une collision. Par exemple, dans le cas où le nombre des nœuds égale à 9, la latence moyenne obtenue est de 120.5s par X-MAC et de 48s par RI-MAC, et la même observation est presque avec tous les autres cas. Ainsi, nous concluons que le protocole RI-MAC est meilleur que X-MAC en termes de latence moyenne.



**Figure -IV.17- Le taux de livraison des paquets.**

La figure –IV.17- présente les résultats obtenus pour la métrique du taux de livraison de paquets. Les résultats montrent que le protocole RI-MAC est capable de donner un taux de livraison plus élevé que le protocole X-MAC grâce à l'utilisation du paradigme de balisage qui utilise la transmission de la balise où la communication est initiée par le nœud récepteur. Cela réduit efficacement la collision et la retransmission de paquets tandis que le X-MAC est classé deuxième qui utilise l'envoi des courts préambules qui peuvent provoquent plus de collision et de retransmission. Par exemple que les valeurs de taux de livraison obtenues dans le cas où le nombre de nœuds est comprise entre 9 et 16 sont : pour X-MAC est 37,8% et 32,77% respectivement, par rapport au protocole RI-MAC on retrouve 60.5% et 57.8% respectivement, et là on remarque que la différence est nette entre eux. Ainsi, nous concluons que le protocole RI-MAC surpasse le protocole X-MAC en termes de taux de livraison.

## Chapitre IV : Simulation et comparaison

les métriques Nombre des Nœuds	Protocole consommant moins d'énergie	Protocole ayant la latence la plus faible	Protocole ayant le taux de livraison supérieur
09	X-MAC	RI-MAC	RI-MAC
16	X-MAC	RI-MAC	RI-MAC
25	X-MAC	RI-MAC	RI-MAC
36	X-MAC	RI-MAC	RI-MAC
49	X-MAC	RI-MAC	RI-MAC
80	X-MAC	RI-MAC	RI-MAC

**Tableau -IV.2- Evaluation des performances pour protocoles simulés**

A partir des résultats d'évaluations trouvés et mentionnés dans le tableau -IV.2- ont été analysés, nous pouvons conclure que le protocole X-MAC fonctionne mal par rapport au protocole RI-MAC. Avec RIMAC, le taux de livraison moyen est élevé et la latence moyenne est inférieure à X-MAC sauf que la valeur de la consommation d'énergie moyenne est plus grande et cela est dû au taux de livraison élevé des paquets.

### IV.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, la simulation de deux protocoles MAC asynchrones X-MAC et RI-MAC par Contiki/Cooja sont présentés. Les résultats des simulations nous ont permis d'évaluer les performances de ces deux protocoles MAC asynchrones dans d'un RCSF, tout en tenant compte de divers facteurs tels que le nombre de nœuds, la taille du terrain de jeu et les autres paramètres. Ces deux protocoles introduisent un duty-cycle pour atténuer l'écoute inactive, la principale cause de consommation d'énergie. Les résultats de toutes les expériences présentées dans ce chapitre selon les paramètres utilisés montrent que RI-MAC est le protocole MAC asynchrone qui a les meilleures performances dans les scénarios expérimentaux. Il surpasse les protocoles X-MAC en termes de taux de livraison de paquets et de latence moyenne. Pour le terme de la consommation d'énergie moyenne le X-MAC est meilleur que RI-MAC dans notre cas qui dépend de nos paramètres définis car le taux de livraison est plus grands mais réellement et d'après la littérature le RI-MAC est meilleur que X-MAC en termes de conservation d'énergie.

***Conclusion  
Générale et  
perspectives***

# Conclusion générale et perspectives

Les RCSF sont devenus d'une grande importance et constituent une nouvelle étape dans le développement des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle thématique attire de plus en plus l'attention en raison de la diversité de ses applications dans de nombreux domaines et en particulier dans l'observation des conditions physiques ou environnementales. Le souci le plus important dans les RCSF est comment réduire la consommation d'énergie utilisée par les capteurs qui sont habituellement alimentés par des piles ou des batteries disposant d'une capacité de stockage bornée où leur manipulation manuellement est difficile lors de leur remplacement ou leur rechargement.

En premier lieu, nous avons commencé notre mémoire par donner une introduction générale dans laquelle la problématique et l'objectif sont présentés. Dans le chapitre I, nous avons donné un aperçu sur les RCSF où nous avons décrit les différentes couches de la pile protocolaire utilisée par un nœud de capteur et leurs différentes sources de consommation d'énergie dans ce type de réseau. Dans le chapitre II, nous avons exposé quelques protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, nous avons décrit le fonctionnement des deux protocoles MAC simulés, le X-MAC et le RI-MAC dans le chapitre III. Le chapitre IV présente nos simulations effectuées, où le choix de simulateur était une procédure délicate vue la présence de plusieurs simulateurs destinés à la simulation des RCSF. Pour notre travail, on a utilisé le simulateur COOJA sous le système Open source Contiki2.7 OS. Notre objectif, dès le début, est d'étudier les protocoles MAC proposés pour les RCSF et de faire une étude comparative entre deux protocoles MAC asynchrones sélectionnés afin d'évaluer les performances d'un RCSF expérimental par l'utilisation de deux types de protocoles MAC asynchrones différents : le protocole X-MAC et protocole RI-MAC.

A partir des résultats d'évaluations trouvés grâce à nos différentes simulations effectuées sur Contiki2.7 OS/COOJA des deux protocoles X-MAC et RI-MAC (voir le chapitre IV) et qui ont été analysés, nous pouvons conclure que X-MAC fonctionne mal par rapport au deuxième protocole RI-MAC. Avec RIMAC, le taux de livraison moyen est élevé et la latence moyenne est inférieure à X-MAC sauf dans notre cas nous avons presque la même quantité moyenne de consommation d'énergie est utilisée par ces deux protocoles et des fois plus avec le RI-MAC en raison du taux moyen élevé de livraison de paquets.

## Conclusion générale et perspectives

---

En bref, nous tenons à souligner que ce travail nous a été très utile et nous a beaucoup aidés à enrichir nos connaissances dans ce domaine que nous considérons comme très intéressant et plein d'avenir.

Enfin, nous pouvons dire que notre travail n'est pas achevé, alors, autres améliorations et perspectives futures restent à étudier. Entre elles, nous pouvons citer :

- ❑ Élargir le champ de comparaison de ces deux protocoles (X-MAC et RI-MAC) en faisant modifier les paramètres de simulation tels que (l'augmentation : de la densité du réseau, dans le nombre de paquets à envoyer par chaque nœud dans le réseau,...etc.) ainsi qu'en ajoutant d'autres métriques d'évaluation telle que : le débit, l'équité, la qualité de service (QOS),...etc., avec l'inclusion d'autres protocoles MAC dans cette étude comparative.
- ❑ Simuler les deux protocoles X-MAC et RI-MAC par l'utilisation des autres simulateurs tels que, MiXiM/OMNeT++, NS2...

# Bibliographie

- [1] :A. Badaoui, « Acquisition de données à distance dans les réseaux de capteurs sans fil », Mémoire de master, Département d'Informatique, Université de Tlemcen, juin 2013
- [2] :A. BOUCIF M.ISSOUFA : Evaluations des performances des protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil, UNIVERSITE IBN KHALDOUN – TIARET, 2020-2021
- [3] :A. Dunkels, B. Grönwall, T. Voigt « Contiki – a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors » 1st IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (IEEE EmNetS-I), Tampa, Florida, USA, November 2004.
- [4] :A. Makhoul, “Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données ,” PhD, University of Franche-Comté, Besançon, 2008.
- [5] :A. Saud, M. Abdullah, Protocoles de contrôle d'accès moyens pour les réseaux de capteurs sans fil Classifications et couches croisées, Conférence internationale sur la communication, la gestion et les technologies de l'information (ICCMIT 2015), pp 1-13.
- [6] :A. Saud, M.Abdullah, Medium Access Control Protocols for Wireless Sensor Networks Classifications and Cross-Layering, International Conference on Communication, Management and Information Technology (ICCMIT 2015).
- [7] :ABDELLAOUI, M. M., & ; KACHOURI, E. M. A. Contributions à l'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil...
- [8] :Ahn, G. S. (2006). Demo Abstract: A Funneling-MAC for High Performance. In Proceedings of the... International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (p. 345). Association for Computing Machinery.
- [9] :ALGORITHME de back-off pour CSMA/CD. Disponible en:<<https://fr.acervolima.com/algorithmme-de-back-off-pour-csma-cd/?fbclid=IwAR3Adl10EBVUvUbz6hX79faDR2gfWn8i3i0M4fGE6oRAuSqRFEP2N6aK9g&gt;>
- [10] : Bachir, A., Plancoulaine, S., Barthel, D., Heusse, M., & Duda, A. (2008). Frame Preamble MAC for MultihopWireless Sensor Networks: Design and Implementation? Ad Hoc Sens. Wirel. Networks, 6(1-2), 33-65

- [11] : Bengheni, A., Didi, F., & Bambrik, I. (2017, December). Energy-saving comparison of asynchronous MAC protocols for wireless sensor networks. In 2017 International Conference on Mathematics and Information Technology (ICMIT) (pp. 263-268). IEEE.
- [12] : Citation: Gurewitz, O.; Zaharia, O. Collision Prevention for Duty-Cycle Receiver-Initiation MAC Protocol via Multiple Access Reservation (MAR-RiMAC). Sensors 2021, 21, 127.  
<https://dx.doi.org/10.3390/s21010127>
- [13] : Cour Networking Académie Cisco.
- [14] : CSMA/CA : Définition et explication de la méthode. Disponible en :<<https://www.ionos.fr/digitalguide/serveur/know-how/csmaca-carrier-sense-multiple-access-with-collision-avoidance/>
- [15] : D. BENDOUDA , Thèse : contrôles des réseaux de capteurs et actionneurs sans fil pour la supervision, Université Ahmed benballah d'oran , 01/2018,p.30.
- [16] : Dessales, D. (2011). Conception d'un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation (Doctoral dissertation, Poitiers).
- [17] : F. Akyildiz, S. Weilian, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A survey on sensor networks. Communications Magazine, IEEE, 40(8), 2002.
- [18] : Frame 802.11 Types and Formats. Disponible en :< <https://howiwifi.com/2020/07/13/802-11-frame-types-and-formats/>.
- [19] : G. Lu, B. Krishnamachari, and C. Raghavendra, "An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in sensor networks," in Ad Hoc and Sensor Networks, April 2004.
- [20] : <https://www.techno-science.net/definition/11711.html> consulté le 17 AVRIL 2021.
- [21] : [https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-de-capteurs-sans-fil-page2.html#ref\\_5](https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Reseau-de-capteurs-sans-fil-page2.html#ref_5).
- [22] : I. DIANE, Thèse : Optimisation de la consommation d'énergie par la prise en compte de la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs, l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 17 juillet 2014, p.30.
- [23] : I.F. Akyildiz. Wireless sensor networks. In Lecture Notes, IFA'07, Georgia Institute of Technology, 2007.

- [24] : I.Rhee, Warrior A, Aia M, Jeongki Min, Sichitiu M L,” Z-MAC : A hybrid MAC for wireless sensor network”, IEEE transactions on Networking vol 16, issue 3 1063-6692, 2008.
- [25] : IEEE 802.15.4 Standard. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs); IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2006.
- [26] : L. Imane.Niar, Thèse : Analyse graphique pour la surveillance dans un réseau de capteurs sans fils, Université Ahmed Ben Bella Oran 1 Juillet 2012.
- [27] : les normes IEEE 802. Disponível em :<  
<http://wapiti.enic.fr/commun/ens/peda/options/ST/RIO/pub/exposes/exposesrio2008/SavoieDherens/intro802.html?fbclid=IwAR1QhmsBCtY8LTbJp54gqKunHmGcytFVXnCv4xeRxftg3cbQIbMDkZ5iqWE>
- [28] : M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, and R. Han. “X -MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks”. in Proc. of SenSys 2006, pp. 307 -320, Nov. 2006.
- [29] : M. Ilyas and I. Mahgoub. &quot; Handbook of sensor networks Compact wireless and wired Sensing Systems&quot;; ISBN 08493196864. CRC PRESS LLS, USA, 2005.
- [30] : M. Lehsaini, “Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique,”PhD, University of Franche-Comté, 2009.
- [31] : M. Younis and T. Nadeem. &quot;Energy efficient MAC protocols for wireless sensor networks&quot;; Technical report, university of Mryland baltimre County, USA, 2004.
- [32] : Martincorena Arraiza, M. (2015). RDC protocols in wireless sensor networks running Contiki.
- [33] : Mémoire de magister thème : Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil
- [34] : mémoire intitulé : NOUVEAU MODÈLE POUR LE POSITIONNEMENT DES SENSEURS AVEC CONTRAINTES DE LOCALISATION.
- [35] : O. Dousse, P. Mannersalo, P. Thiran, Latency of wireless sensor networks with uncoordinated power saving mechanisms, in: Proc. 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc '04), Tokyo, Japan, May 24–26, 2004.

- [36] : P Rachelin Sujae, S Arulselvi. Receiver-Initiated Medium Access Control (RI-MAC) Protocols. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-8, June 2019.
- [37] : R. Kacimi, R. Dhaou, A.L. Beylot, A. Delye Mazieux, V. Gauthier, M.Marot, J. Vaudour, and M. Becker, Les réseaux de capteurs sans fil. In Livrable Projet CAPTEURS, SP1, V1.2, IRIT-ENSEEIH et INT, Rapport de recherche INT, 2006.
- [38] : R.Yadav, S.Varma, and N.Malaviya, A Survey Of Mac Protocols For Wireless Sensor Networks, UbiCC Journal, 4 (3) (2009).
- [39] : Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M.B. Srivastava, Energy aware wireless microsensor networks. IEEE Signal Processing Magazine, 19(2) :4050, Mars 2002.
- [40] : S.M Amal, Thèse : ETUDE DU RSSI POUR L'ESTIMATION DE LA DISTANCE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL, Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 12 Juin 2017
- [41] : Shahin Farahani, in ZigBee Wireless Networks and Transceivers, 2008
- [42] : Sun, Y., Gurewitz, O., & Johnson, D. B. (2008, November). RI-MAC: a receiver-initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks. In Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems (pp. 1-14).
- [43] : T. van Dam and K. Langendoen. An adaptive energy efficient mac protocol for wireless wireless sensor networks sensor networks. In The 1st international conference on Embedded networked sensor system (SenSys), pages 171-180, Los Angeles, CA, USA, 2003.
- [44] : Tabaa, M. (2014). Conception d'un système de transmission ultra-large bande par impulsions orthogonales (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- [45] : Tang, L., Sun, Y., Gurewitz, O., & Johnson, D. B. (2011, April). PW-MAC: An energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks. In 2011 Proceedings IEEE INFOCOM (pp. 1305-1313). IEEE.
- [46] : Thang, V. C. (2019). A comparative study of network performance between ContikiMAC and XMAC protocols in data collection application with ContikiRPL. International Journal of Computer Network and Information Security, 11(8), 32-37.
- [47] : Tsitsigkos, A., Entezami, F., Ramrekha, T. A., Politis, C., & Panaousis, E. A. (2012, April). A case study of internet of things using wireless sensor networks and smartphones. In Proceedings of

the Wireless World Research Forum (WWRF) Meeting: Technologies and Visions for a Sustainable Wireless Internet, Athens, Greece (Vol. 2325)

- [48] : van den Berg, H., Roijers, F., Castro, M., Gomez, C., Paradells, J., Staub, T., ... & Dely, P. (2009). Multi-hop wireless networks.
- [49] : W. Ye and J. Heidemann. Medium access control in wireless sensor networks. In USC/ISI Technical report ISI-TR-580, 2003.
- [50] : Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks". In Proceedings of the IEEE Infocom, pages 1567–1576, 2002.
- [51] : Y.Sun, O.Gurewitz, D.Johnson, RI-MAC: A Receiver-Initiated Asynchronous Duty-Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks, Department of Computer Science, Rice University, Houston, TX, USA, Novembre 2008.
- [52] : Yacine Challal. Thèse : Réseaux de Capteurs Sans Fils, Version 1 ,18/11/2008.
- [53] : Yee, G., Anderson, E., & Han, R. (2006, November). X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In Proceedings of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys).
- [54] : Ye-Qiong Song. Réseaux de Capteurs Sans Fil : Comment Fournir La Qualité de Service Tout En Economisant l'Énergie ? Ecole d'été temps réel 2013, IRIT Toulouse, Aug 2013, Toulouse, France. Ffhal-00905864f.
- [55] : Z. Bouzidi and A. Benameur, "mise en place d'un réseau de capteur sans fil pour l'irrigation intelligente", Master's thesis, M' mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique, Juillet, 2012.)
- [56] : Z. MAMMERI, Thèse : Master d'informatique – M1 Cours de Réseaux, université Paul Sabatier, 1998 – 2011.