

UNIVERSITÉ MOHAMMED V  
FACULTÉ DES SCIENCES  
Rabat



N° d'ordre : 2756

## Thèse de Doctorat

Présentée par  
**Anouar DARIF**

Discipline : Sciences de l'ingénieur  
Spécialité : Informatique et Télécommunications

Titre

### **Contributions à l'amélioration des performances des Réseaux de Capteurs sans fil à base d'IR-UWB.**

Soutenue le 22/01/2015, devant le jury composé de :

**Président :**

Driss ABOUTAJDINE PES, Faculté des Sciences Rabat.

**Examineurs :**

Abdelkrim AMMOUMOU PES, EST, Casablanca.

Samir KADIRI PES, Faculté des Sciences Rabat.

Hicham MEDROMI PES, ENSEM, Casablanca.

Mohammed RZIZA PH, Faculté des Sciences Rabat.

Rachid SAADANE PH, EHTP, Casablanca.





---

## AVANT-PROPOS

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été effectués au Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications (LRIT), à la Faculté des Sciences de Rabat (FSR) Université Mohammed V, Unité associée au CNRST (URAC29), sous la direction du Professeur Driss ABOUTAJDINE.

Je tiens à remercier vivement :

Monsieur Driss ABOUTAJDINE, Professeur d'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat, Directeur du Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST), Responsable du Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications (LRIT) et Directeur de ma thèse, pour la confiance qu'il m'a accordée en m'autorisant à mener mes travaux de recherche dans ce laboratoire et d'avoir présidé ce jury de thèse, et pour m'avoir encadré avec un grand intérêt ainsi que pour ses encouragements, ses conseils avisés, son ouverture d'esprit, sa disponibilité et bien sûr ses qualités scientifiques exceptionnelles.

Monsieur Rachid SAADANE, Professeur habilité à l'École Hassania des travaux publics de Casablanca, pour avoir co-encadré ce travail de thèse, son aide, ses recommandations, sa patience et ses qualités humaines. Sans oublier bien sûr, le partage inconditionnel de ses connaissances avec le monde de la recherche.

Monsieur Samir KADIRI, Professeur d'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour l'honneur qu'il me fait en faisant partie de ce jury de thèse en tant qu'examineur.

Monsieur Hicham MEDROMI, Professeur d'enseignement supérieur à l'École Nationale Supérieure d'Electricité et Mécanique de Casablanca, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Monsieur Abdelkrim AMMOUMOU, Professeur d'enseignement supérieur à l'École Supérieure de Technologie de Casablanca, pour avoir accepté de rapporter et d'examiner ce travail. Ses remarques constructives m'ont beaucoup aidé à améliorer ce manuscrit.

Monsieur Mohammed RZIZA, Professeur habilité à la Faculté des Sciences de Rabat, pour avoir rapporté et examiné ce manuscrit. Ses suggestions lors de la lecture de ma thèse m'ont permis d'apporter des améliorations à la qualité de cette dernière.

Tous les membres du laboratoire LRIT, Professeurs et Doctorants, pour leur esprit de groupe. Qu'ils trouvent ici le témoignage de toute mon estime et ma sincère sympathie.

Je remercie chaleureusement ma famille qui a supporté toutes les difficultés morales et matérielles pour me soutenir tout au long de mes études et pour leurs félicitations lors de mes réussites...

Enfin, merci à ceux que je n'ai pas pu les citer, mais auxquels je réitère mes sincères remerciements.



---

## RÉSUMÉ

Les domaines d'application des réseaux connaissent une expansion continue. Cette expansion a donné naissance à de nouvelles générations de réseaux à divers usages. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) font partie de ce type de réseaux émergents, mais avec des propriétés et des contraintes spécifiques par rapport aux architectures des réseaux classiques. Ils offrent des applications très variées et couvrent plusieurs domaines à caractère scientifique. Les capteurs employés dans ce type de réseaux se présentent sous forme de petits équipements électroniques et sont souvent déployés à grand nombre et durant de longues périodes. Et vu leurs ressources énergétiques limitées, les travaux de recherche dans ce type de réseaux consacrent une grande partie à la conception et le développement de protocoles de communication fiables et efficaces en termes d'énergie consommée.

La technologie Ultra Large Bande (UWB) a suscité un intérêt remarquable des chercheurs dans le domaine des communications sans fil. Cela est dû à ses nombreux atouts liés à la nature des ondes transmises, et aux larges possibilités offertes en termes de débit. Actuellement, la technologie radio impulsionnelle ultra large bande (IR-UWB) constitue une solution très pertinente et prometteuse pour les RCSFs. Ceci est motivé en premier lieu par : sa faible consommation d'énergie, qui constitue l'une des contraintes majeures pour ce type de réseaux. En deuxième lieu, par sa nature impulsionnelle qui la rend robuste à l'évanouissement multi-chemin. En troisième lieu, par sa précision élevée qui s'utilise dans la localisation à base du temps de propagation. Grâce à ces avantages, IR-UWB a été retenue dans le cadre du standard IEEE 802.15.4a.

Cette thèse a pour objet l'évaluation et l'amélioration du potentiel de la nouvelle technologie IR-UWB pour des applications de RCSFs. Ainsi, la conception d'un protocole d'accès au médium dédié à cette technologie est la principale fin de notre travail. Cette conception vise à atteindre un niveau très efficace de gestion de la consommation d'énergie avec le meilleur rendement possible. Ce protocole met en œuvre le principe de la mise en veille synchronisée de l'émetteur-récepteur radio pour réduire la consommation, combiné à une annonce de présence avec des messages balises. Cette annonce permet aux nœuds du réseau de découvrir les moments de réveil respectifs et d'échanger des paquets. Des scénarios extensifs de simulation ont été utilisés pour l'évaluation des performances de ce protocole. Ils ont révélé que les performances en termes de consommations énergétiques et de rendement peuvent être qualifiées de très satisfaisantes ou d'excellentes.

**Mots clés :** RCSF, IR-UWB, MAC, WideMac, SWIMAC, Consommation d'énergie, Taux de livraison de paquets, IEEE 802.15.4a, Omnet++, MiXiM.



---

## ABSTRACT

The networks application areas are experiencing continuous expansion. This expansion has led to new generations of networks for various purposes. Wireless sensor networks (WSNs) are part of this type of emerging networks, but with specific properties and constraints compared to traditional network architectures. They offer a wide variety of applications and cover several scientific areas. The sensors used in such networks appear as small electronic equipment and are often deployed in large number and long periods. And since their limited energy resources, the research in this type of networks devoted much interest to the design and development of reliable and efficient communication protocols in terms of consumed energy.

Ultra Wide Band (UWB) technology has aroused considerable interest among researchers in the field of wireless communications. This is due to its numerous advantages related to the nature of the transmitted waves as well as the wide opportunities in terms of rate. Currently, impulse radio ultra wideband (IR-UWB) is a very relevant and promising solution for WSN. This is motivated primarily by its low power consumption, which is one of the major constraints on such networks. Second, by its nature, which makes impulse robust to multi-path fading. Third, by its high precision that is used in the location based on the propagation time. With these advantages, IR-UWB has been selected as part of the IEEE 802.15.4a standard.

The purpose of this thesis is the evaluation and improvement of the IR-UWB potential for WSN applications. Thus, the design of a medium access protocol dedicated to this technology was the main purpose of our work. This design aims to achieve a highly effective managerial level of energy consumption with the best possible performance. This protocol implements the principle of synchronized radio transceiver hibernation to reduce consumption and a presence announcement with beacon message. This announcement allows the network's nodes to discover the respective wakeup moments to exchange data packets. Extensive simulation scenarios were used to evaluate the performance of this protocol. They revealed that the performance in terms of energy consumption as well as throughput can be classified as very satisfactory or excellent.

**Keywords :** WSN, IR-UWB, MAC, WideMac, SWIMAC, Energy consumption, Packet delivery ratio, IEEE802.15.4a, Omnet++, MiXiM.



---

## TABLE DES MATIÈRES

Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des notations et abréviations	viii
Liste des figures	xiv
Chapitre 1 : Introduction	1
Liste des tableaux	1
Chapitre 2 : Réseaux de capteurs sans fil	4
2.1 Introduction	4
2.2 Architecture d'un nœud capteur	5
2.3 Pile protocolaire dans un RCSF	7
2.3.1 Couche physique	7
2.3.2 Couche liaison de données	8
2.3.3 Couche réseau	9
2.3.4 Couche Transport	9
2.3.5 Couche application	9
2.3.6 Plans de gestion	9
2.4 Domaines d'application des RCSFs	10
2.5 Protocoles de la couche MAC	12
2.5.1 Protocoles basés sur CSMA/CA	13
2.5.2 Protocoles basés sur NP-CSMA-PS	15
2.5.3 Protocoles basés sur TDMA	17
2.5.4 Protocoles MAC hybrides	20
2.6 Modèle de communication	23
2.7 Modèle de détection	25
2.8 Modèle de consommation d'énergie	26
2.8.1 Énergie de capture	27
2.8.2 Énergie de communication	27

2.8.3	Énergie de traitement de données . . . . .	28
2.9	Technologies de transmission sans fil pour les RCSFs . . . . .	29
2.10	Facteurs et contraintes des RCSF . . . . .	30
2.11	Classification des RCSFs . . . . .	31
2.12	Conclusion . . . . .	32
<b>Chapitre 3 : Performances d'IR-UWB pour les RCSFs . . . . .</b>		<b>34</b>
3.1	Introduction . . . . .	34
3.2	Présentation de l'UWB . . . . .	35
3.2.1	Définition du signal UWB . . . . .	35
3.2.2	Utilité de l'UWB . . . . .	36
3.2.3	Régulation de l'UWB . . . . .	37
3.3	Radio Impulsionnelle UWB . . . . .	39
3.3.1	Structure du symbole IR-UWB . . . . .	41
3.3.2	Avantages d'IR-UWB . . . . .	42
3.3.3	Modulations associées à l'IR-UWB . . . . .	43
3.3.4	Accès multiple en bande unique . . . . .	46
3.3.5	Propagation . . . . .	49
3.3.6	Modélisation du canal de propagation . . . . .	51
3.3.7	Systèmes d'émission IR-UWB . . . . .	54
3.3.8	Réception des signaux IR-UWB . . . . .	56
3.4	Le standard IEEE 802.15.4a . . . . .	59
3.4.1	Description de la couche PHY-UWB . . . . .	60
3.4.2	Spécifications relatives à l'émission . . . . .	63
3.5	Les RCSFs et IR-UWB . . . . .	64
3.5.1	Avantages . . . . .	64
3.5.2	Évaluation des performances . . . . .	66
3.6	Conclusion . . . . .	70
<b>Chapitre 4 : Protocoles MAC pour les RCSFs à base d'IR-UWB . . . . .</b>		<b>71</b>
4.1	Introduction . . . . .	71
4.2	Particularités des protocoles MAC dédiés aux RCSFs . . . . .	72
4.3	Familles de protocoles MAC efficaces en énergie . . . . .	73
4.3.1	Protocoles à ordonnancement . . . . .	73
4.3.2	Protocoles à découpage temporel . . . . .	75
4.3.3	Protocoles à échantillonnage de préambule . . . . .	76
4.4	Protocoles MAC et IR-UWB . . . . .	77
4.4.1	Protocoles basés sur l'expression de la capacité . . . . .	77
4.4.2	Protocoles basés sur une utilisation des codes de saut . . . . .	78
4.4.3	Protocoles exploitant la nature impulsionnelle des signaux . . . . .	79
4.5	Protocole ALOHA . . . . .	80
4.5.1	présentation . . . . .	80

4.5.2	diagrammes de transition . . . . .	80
4.5.3	Les performances d'ALOHA . . . . .	82
4.6	Protocole WideMac . . . . .	84
4.6.1	Logique de conception de WideMac . . . . .	84
4.6.2	Description de WideMac . . . . .	85
4.6.3	Algorithme de backoff de WideMac . . . . .	87
4.7	Analyse analytique de la consommation d'énergie . . . . .	88
4.7.1	Objectifs des modèles et hypothèses . . . . .	89
4.7.2	Modèles de consommation d'énergie . . . . .	90
4.8	Évaluation des performances énergétiques . . . . .	92
4.8.1	Simulateurs pour RCSFs . . . . .	92
4.8.2	Choix du simulateur . . . . .	94
4.8.3	Scénario de simulation . . . . .	95
4.8.4	Résultats et analyse . . . . .	96
4.9	Conclusion . . . . .	97
<b>Chapitre 5 : SWIMAC : Nouveau protocole MAC pour RCSF à base d'IR-UWB . . . . .</b>		<b>99</b>
5.1	Introduction et motivation . . . . .	99
5.2	Problème de communication dans un seul sens . . . . .	100
5.2.1	Présentation du problème . . . . .	100
5.2.2	Résolution du problème . . . . .	100
5.2.3	Évaluation . . . . .	103
5.3	Problème d'absence total de communication entre deux nœuds . . . . .	104
5.3.1	Présentation du problème . . . . .	104
5.3.2	Résolution du problème . . . . .	105
5.3.3	Évaluation . . . . .	106
5.4	Protocole SWIMAC . . . . .	111
5.4.1	Gestion des messages de diffusion . . . . .	111
5.4.2	Algorithme de Backoff . . . . .	112
5.4.3	Diagrammes de fonctionnement de SWIMAC . . . . .	113
5.4.4	Evaluation . . . . .	115
5.5	Conclusion . . . . .	118
<b>Chapitre 6 : Conclusion générale et perspectives . . . . .</b>		<b>120</b>
<b>Liste des publications</b>		<b>122</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>		<b>124</b>



---

## LISTE DES ACRONYMES

WSN	<i>Wireless Sensors Network</i>
RCSF	<i>Réseau de Capteurs Sans Fil</i>
WIFI	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
RFID	<i>Radio Frequency IDentification</i>
CAN	<i>Convertisseur Analogique Numérique</i>
DSP	<i>Digital Signal Processors</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuit</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
SMP	<i>Sensor Management Protocol</i>
SQDDP	<i>Sensor Query and Data Dissemination Protocol</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
NP-CSMA-PS	<i>Non-Persistent Carrier Sensing Multiple Access with Preamble Sampling</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>
RTS	<i>Request To Send</i>
FRTS	<i>Futur Request To Send</i>
CTS	<i>Clear To Send</i>
ACK	<i>Acknowledgment (Acquittement)</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
LPL	<i>Low Power Listening</i>
NP	<i>Neighbor Protocol</i>
SEP	<i>Schedule Exchange Protocol</i>
AEA	<i>Adaptive Election Algorithm</i>
T-MAC	<i>Timeout MAC</i>
S-MAC	<i>Sensor MAC</i>
BMAC	<i>Berkeley MAC</i>

---

TRAMA	<i>TR</i> affic Adaptive Medium Access
FLAMA	<i>F</i> Low-Aware Medium Access
GMAC	<i>G</i> ateway MAC
Z-MAC	<i>Z</i> ebra MAC
SMACS	<i>(Self-organizing Medium Access Control for Sensor network)</i>
DW-MAC	<i>(Demand Wakeup Medium Access Control)</i>
AS-MAC	<i>A</i> synchronous Scheduled MAC
GTIM	<i>G</i> ateway Traffic Indication Message
RAVE	<i>R</i> esource Adaptive Voluntary Election
LCL	<i>L</i> ow Contention Level
HCL	<i>H</i> igh Contention Level
DSP	<i>D</i> ensité Spectrale de Puissance
UWB	<i>U</i> ltra Wide Band
IR-UWB	<i>I</i> mpulse Radio Ultra Wide Band
TH-UWB	<i>T</i> ime-Hopping Ultra Wide Band
DS-UWB	<i>D</i> irect-Sequence UWB
UNII	<i>U</i> nlicensed National Information Infrastructure
FCC	<i>F</i> ederal Communications Commission
NB	<i>N</i> arrow Band
SNR	<i>S</i> ignal-to-Noise Ratio
SINR	<i>S</i> ignal-to-Interference-plus-Noise Ratio
WPAN	<i>W</i> ireless Personal Area Networks
MAN	<i>M</i> etropolitan Area Networks
LAN	<i>L</i> ocal Area Networks
OSI	<i>O</i> pen Systems Interconnection
WPAN	<i>W</i> ireless Personal Area Network
OMNeT++	<i>O</i> bjective Modular Network Testbed in C++
ISM	<i>I</i> ndustrial Scientific and Medical
PMD	<i>P</i> hysical Medium Dependence
SHR	<i>S</i> ynchronization Header
PHR	<i>P</i> hysical Header
PSDU	<i>P</i> hysical Service Data Unit
SAP	<i>S</i> ervice Access Point
EPSDU	<i>E</i> ncoded Physical Service Data Unit
SYNC	<i>S</i> ynchronization
SFD	<i>S</i> tart Frame Delimiter
SECDED	<i>S</i> ingle Error Correct, Double Error Detect
FEC	<i>F</i> orward Error Correction
RRC	<i>R</i> oot Raised Cosine
BPM-BPSK	<i>B</i> urst Position Modulation-Binary Phased Shift Keying
BER	<i>B</i> inary Error Rate
LOS	<i>L</i> ine Of Sight
NLOS	<i>N</i> on Line Of Sight

CAP	<i>Contention Access Period</i>
CAF	<i>Contention Free Period</i>
GTS	<i>Garanteed Time Slots</i>
IRMA	<i>impulse radio multiple access</i>
RTR	<i>Ready To Receive</i>
RCPC	<i>Rate Compatible Punctured Convolutionnal</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat ReQuest</i>
BEB	<i>Binary Exponential Backoff</i>
RI-MAC	<i>Receiver Initiated MAC</i>
MILD	<i>Multiplicative Increase and Linear Decrease</i>
LBT	<i>Listen Before Talk</i>
NS	<i>Network Simulator</i>
OTCL	<i>Object-oriented Tool Command Langage</i>
BE	<i>Backoff Exponent</i>
SN	<i>Synchronized Node</i>
AB	<i>Always Backoff</i>
IS	<i>Is Synchronized</i>
NW	<i>Number Window</i>
CW	<i>Contention Window</i>
RS	<i>Requires Synchronization</i>
MSR	<i>Max Synchronization Retries</i>
MSS	<i>Max Synchronization Sending</i>
MSCW	<i>Minimun Synchronizaton Contention Window</i>
M-BEB	<i>Modified Binary Backoff Exponent</i>
SWIMAC	<i>Synchronized WideMAC</i>



---

## LISTE DES FIGURES

2.1	Un exemple d'un réseau de capteurs sans fil. . . . .	5
2.2	Architecture d'un nœud capteur. . . . .	6
2.3	Pile protocolaire. . . . .	7
2.4	Exemples d'applications des RCSFs. . . . .	12
2.5	La période d'activité et de mise en veille dans S-MAC. . . . .	13
2.6	La période d'écoute adaptative de T-MAC vs la période d'écoute fixe de S-MAC. . . . .	14
2.7	Le problème de mise en veille. . . . .	15
2.8	Technique de préambule dans WiseMac (P : Préambule). . . . .	16
2.9	Format d'une trame TRAMA. . . . .	17
2.10	Découpage temporel de FLAMA. . . . .	18
2.11	Planification dans DW-MAC basée sur le mappage un-à-un. . . . .	20
2.12	La trame de GMAC [31]. . . . .	21
2.13	Mappage proportionnelle un-à-un du protocole AS-MAC . . . . .	23
2.14	Modèle de communication : <i>"binary disc model"</i> . . . . .	24
2.15	Modèle de détection : <i>"Probabilistic sensing model"</i> . . . . .	26
2.16	Modèles consommateurs de l'énergie d'un nœud capteur. . . . .	27
2.17	L'énergie consommée par un nœud capteur pour l'émission et la réception d'un message de k bits. . . . .	29
2.18	Consommation de l'énergie par un nœud capteur. . . . .	29
3.1	Classification des signaux selon leurs spectres. . . . .	35
3.2	Spectres larges pour impulsions brèves. . . . .	36
3.3	Masque FCC pour l'émission des signaux UWB en indoor. . . . .	38
3.4	Masque FCC pour l'émission des signaux UWB en outdoor. . . . .	38
3.5	Masques d'émission des systèmes UWB. . . . .	39
3.6	Représentations temporelles de l'impulsion gaussienne et ses 3 premières dérivées. . . . .	40
3.7	Représentations fréquentielles de l'impulsion gaussienne et ses 3 premières dérivées. . . . .	41
3.8	Impulsion Gaussienne transposée en fréquence - $f_0 = 6.85GHz$ et $\tau = 91ps$ . . . . .	42
3.9	Structure du signal TH-UWB. . . . .	42
3.10	Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en PAM. . . . .	44

3.11	Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en OOK. . . . .	44
3.12	Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en PPM. . . . .	45
3.13	Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en BPSK. . . . .	46
3.14	Illustration du principe de la modulation PAM-TH. . . . .	47
3.15	Illustration du principe de la modulation PPM-TH. . . . .	48
3.16	Comparaison entre la représentation temporelle du (a) TH-UWB et du (b) DS-UWB. . . . .	49
3.17	Puissance reçue en fonction de la distance. . . . .	50
3.18	Puissance reçue en fonction du temps. . . . .	52
3.19	Réalisations de la RI des canaux du modèle IEEE 802.15.3a. . . . .	55
3.20	RI des modèles de canaux CM1 et CM2 de la norme IEEE 802.15.4a. . . .	56
3.21	Principe d'un émetteur UWB. . . . .	56
3.22	Structure d'un récepteur IR-UWB cohérent. . . . .	57
3.23	Structure d'un récepteur IR-UWB différentiel. . . . .	58
3.24	Structure d'un récepteur IR-UWB non-cohérent à détection d'énergie. . . .	59
3.25	Bandes de fréquence de la couche PHY-UWB du standard IEEE 802.15.4a. .	60
3.26	Diagramme des opérations de la couche IEEE 802.15.4a PHY-UWB. . . . .	61
3.27	Format d'une trame IEEE 802.15.4a PHY-UWB. . . . .	62
3.28	Schéma des modulations de la couche IEEE 802.15.4a UWB-PHY. . . . .	63
3.29	Comparaison des densités spectrales de puissances des impulsions usuelles.	64
3.30	Temps de transmission en fonction de la taille de données. . . . .	68
3.31	Énergie consommée en fonction de la taille de données. . . . .	68
3.32	Énergie consommée en fonction du nombre de nœuds. . . . .	69
3.33	L'efficacité du codage des données en fonction de la taille. . . . .	69
4.1	La surécoute dans une transmission. . . . .	72
4.2	Découpage temporel de la super-trame de la norme IEEE 802.15.4 . . . . .	74
4.3	Exemple de protocole à découpage du temps synchronisé . . . . .	75
4.4	Protocole à échantillonnage de préambule. . . . .	76
4.5	Illustration de la technique UnSlotted ALOHA. . . . .	80
4.6	Illustration de la technique Slotted ALOHA. . . . .	81
4.7	Diagramme de transition pour UnSlotted ALOHA. . . . .	81
4.8	Diagramme de transition pour Slotted ALOHA. . . . .	82
4.9	Période de vulnérabilité dans UnSlotted ALOHA. . . . .	83
4.10	Période de vulnérabilité dans Slotted ALOHA. . . . .	83
4.11	Efficacité du protocole ALOHA. . . . .	84
4.12	Émission d'une balise du protocole WideMac. . . . .	86
4.13	Fonctionnement normale de WideMac. . . . .	86
4.14	Illustration du fonctionnement de WideMac telle que décrite dans [139] . .	87
4.15	Trafic à base de "Stocker & Achemine" : le nœud 2 reçoit un paquet du nœud 1, le stocke puis l'achemine au nœud 3. . . . .	89
4.16	Modèle détaillé de la radio comprenant des états transitoires. . . . .	91

---

4.17	Diagramme UML représentant les relations entre Omnet++, les classes MiXiM et MiXiM UWBIR. . . . .	95
4.18	Scénario de simulation de 25 nœuds. . . . .	96
4.19	L'énergie moyenne consommée par les nœuds. . . . .	97
5.1	Livraison de paquets pour le scénario 25 nœuds. . . . .	101
5.2	Nombre de nœuds non communicants. . . . .	101
5.3	Cas de communication dans un seul sens(de B vers A). . . . .	101
5.4	Procédure normale de synchronisation. . . . .	102
5.5	Livraison de paquets pour le scénario 25 nœuds. . . . .	104
5.6	Absence de communication dans les deux sens. . . . .	104
5.7	Synchronisation dans le cas d'absence de communication dans les deux sens.105	
5.8	Taux de livraison des paquets pour $T_a = 0.05 * T_W$ . . . . .	108
5.9	Taux de livraison des paquets pour $T_a = 0.1 * T_W$ . . . . .	108
5.10	Taux de livraison des paquets pour $T_a = 0.15 * T_W$ . . . . .	108
5.11	Livraison de paquets pour le scénario 16 nœud. . . . .	109
5.12	Taux de livraison des paquets. . . . .	110
5.13	Consommation moyenne de l'énergie des nœuds. . . . .	110
5.14	Digramme de fonctionnement de SWIMAC durant le statut TX. . . . .	114
5.15	Digramme de fonctionnement de SWIMAC durant le statut RX. . . . .	116
5.16	Taux de livraison des paquets. . . . .	118
5.17	Consommation moyenne de l'énergie des nœuds. . . . .	119



---

## LISTE DES TABLEAUX

3.1	Paramètres des modèles de canaux Ghassemzadeh pour les environnements résidentiels LOS et NLOS. . . . .	53
3.2	Paramètres des canaux de la norme IEEE 802.15.3a. . . . .	54
3.3	Quelques paramètres des canaux de la norme IEEE 802.15.4a. . . . .	55
3.4	Principaux avantages et bénéfices des systèmes ULB par rapport aux systèmes à bande étroite. . . . .	65
3.5	Comparaison des techniques bande étroite et ULB. . . . .	66
3.6	Paramètres typiques des trois technologies. . . . .	67
4.1	Paramètres de la radio en consommation d'énergie. . . . .	91
4.2	Paramètres de la radio en temporisation. . . . .	91
5.1	Paramètres de synchronisation de WideMac. . . . .	103
5.2	Paramètres additionnels de synchronisation de WideMac. . . . .	106
5.3	Structure simplifié d'un message balise. . . . .	112
5.4	Paramètres MAC. . . . .	117

A côté de divers types de technologies sans fil continuellement mises à jour comme Bluetooth, Zigbee, la technologie récente Ultra Large Bande (Ultra Wide Band (UWB)) commence à émerger et enrichir les communications à courte portée. Cette diversité a été rendue possible grâce aux avancées technologiques des systèmes sans fil. Ces technologies de radiocommunication à courte portée complètent efficacement les applications d'autres technologies telles que le Wi-Fi, WiMAX et les communications cellulaires à longue portée. Avec l'apparition d'un grand nombre de dispositifs ad hoc de très faible coût comme les capteurs et les puces RFID dotés de liens de communication à faible débit de données, à faible puissance et à courte portée, un besoin croissant de débit élevé de données, et de communications à faible puissance commence à voir le jour grâce aux exigences des applications multimédias. La technologie UWB offre une occasion sans précédente pour accélérer encore l'évolution et élargir le paysage de son application en offrant des capacités exceptionnelles en termes de débits et de puissances consommées.

La technologie UWB est définie par la commission fédérale des communications (Federal Communications Commission : FCC) comme tout système de communication sans fil qui occupe une bande passante fractionnelle plus de 20% de la fréquence centrale. Elle consiste à utiliser des signaux dont le spectre s'étale sur une large bande de fréquences, typiquement de l'ordre de 500 MHz à plusieurs GHz. Deux approches distinctes caractérisent les signaux UWB : la technique mono-bande, et la technique multi-bande. La première est fondée sur l'émission d'impulsions de très courte durée (Impulse Radio-UWB) où le signal est combiné avec les techniques d'étalement de spectre incluant : la séquence directe (Direct Sequence (DS)) et le saut temporel (Time Hopping (TH)). La deuxième approche quant à elle est basée sur l'utilisation simultanée de plusieurs porteuses. La bande de fréquences dans cette approche est subdivisée en plusieurs sous-bandes, et la modulation utilisée dans chaque sous-bande est l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ou l'FH (Frequency Hopping).

La radio impulsionnelle ultra large bande (Impulse Radio Ultra Wide Bande : IR-UWB) est fondamentalement différente des technologies radios à bande étroite (ex. Bluetooth, Zigbee, etc), en ce que les données sont transmises en utilisant une série d'impulsions très courtes, plutôt que par la modulation d'une porteuse avec les données. Elle fonctionne sur des fréquences existantes affectées à des radios à bande étroite, mais, afin d'éviter les interférences, les organismes de réglementation n'autorisent d'utiliser que des densités de puissance très basses. La nature impulsionnelle des signaux IR-UWB les rend robustes à l'évanouissement multi-chemin, car la courte durée des impulsions permet d'éviter leur

superposition au récepteur. Ainsi, l'IR-UWB présente les caractéristiques d'une grande largeur de bande disponible, d'un large champ d'application du compromis entre taux et portée de données, et de l'exploitation de très faible puissance. Ces avantages s'intersectent avec les exigences de plusieurs types de réseaux comme les réseaux ad hoc et en particulier les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs).

Les réseaux de capteurs sans fil sont des systèmes formés de plusieurs dispositifs informatiques à bas prix, durables et très spécialisées, équipés d'un ou plusieurs capteurs. L'émergence de cette nouvelle classe de dispositifs est le fruit d'une tendance continue de miniaturisation des systèmes micro-électroniques, ainsi qu'aux progrès réalisés dans la conception de l'électronique de communication sans fil. Le champ d'applications de ce type de réseaux de capteurs est de plus en plus élargi. Il couvre le domaine militaire, médical, commercial, etc. En particulier dans le domaine environnemental, ils sont utilisés pour évaluer la pollution de l'air, de détecter et de prévenir les incendies de forêt, les inondations et les chutes rocheuses, et de surveiller la structure des bâtiments et des ponts, etc.

Les plates-formes de ce type de réseau doivent tenir compte de plusieurs contraintes. Des contraintes de la fiabilité, de la consommation d'énergie, de la taille des données et de coût, etc. Les systèmes de communications sans fil ainsi utilisés, et les protocoles de la couche MAC qui y sont déployés, sont nos principales préoccupations dans cette thèse. En particulier, notre intérêt est la question de la mise en application de la technologie IR-UWB dans ce domaine, et plus précisément, la façon d'exploiter les caractéristiques de cette technologie pour la conception de protocoles MAC. Une réponse judicieuse à cette question a sûrement des impacts positifs directs sur la fiabilité et la durée de vie de ce type de réseaux, favorisant ainsi le déploiement de cette technologie à grande échelle.

Dans le cadre de cette thèse, le thème principal de notre travail se concentre sur les questions de recherche liées à l'utilisation de la technologie IR-UWB dans les réseaux de capteurs sans fils. Aussi, la proposition des solutions aux problèmes survenus lors de la conception des RCSFs à base d'IR-UWB. Partant, les principales contributions de cette thèse sont les suivantes :

- Performances d'IR-UWB dans les RCSFs : Nous avons montré l'applicabilité et l'impact positif de l'utilisation de cette nouvelle technologie dans ce type de réseaux. Ainsi, nous l'avons comparée avec les deux technologies Zigbee et Bluetooth et nous avons évalué ses performances en termes de rendement et consommation énergétique.
- La couche MAC : Nous avons étudié et investigué le protocole WideMac. C'est un protocole MAC à très bas consommation adapté à cette technologie et dédié aux RCSFs. Ainsi, nous avons présenté une étude analytique ainsi qu'une évaluation par simulation de sa consommation d'énergie. A coté de ses avantages coté optimisation de la consommation énergétique, nous avons enquêté ses problèmes liés à la synchronisation des périodes de réveil. Conséquemment, nous avons réalisé que c'est, inévitablement, un problème qui acte négativement sur le rendement de WideMac.
- Mécanisme de synchronisation : Nous avons introduit et implémenté un nouveau mécanisme de synchronisation des périodes de réveil et nous l'avons intégré dans le protocole SWIMAC.
- Analyse des performances du protocole SWIMAC : Nous avons montré que le pro-

---

protocole SWIMAC a réussi à pallier aux problèmes d'absence et de rupture de communication observés dans le protocole WideMac. En plus, et même avec l'introduction du mécanisme de synchronisation, les scénarios de simulation réalisés ont montré que les performances en termes de consommation énergétique de SWIMAC sont meilleures, et atteignent celles de WideMac. Et outre ces performances énergétiques, le rendement de SWIMAC en termes de taux de livraison des paquets est au rendez-vous et les résultats des simulations peuvent être qualifiés de très satisfaisants ou d'excellents, par rapport à WideMac.

Le reste de ce rapport de thèse est organisé comme suite :

Dans le deuxième chapitre, nous présentons en détail les réseaux de capteurs sans fil, en insistant sur leurs spécificités par rapport aux autres types de réseaux. En plus, nous citons leurs principaux domaines d'application. En suite, nous faisons un état de l'art sur les principales familles de protocoles MAC ainsi que les modèles de communication utilisés dans les RCSFs. Nous spécifions enfin, les principaux défis et challenges dans ce type de réseaux.

Dans le troisième chapitre, après un état de l'art sur la technologie UWB, nous proposons IR-UWB comme nouvelle technologie de transmission sans fil pour les RCSFs. Nous présentons ensuite, les avantages et l'impact positif de son utilisation sur les RCSFs. A la fin de ce chapitre, les résultats d'étude des performances par simulation de cette technologie, ainsi que sa comparaison avec des technologies de transmission à bande étroite sont données.

En suite dans le quatrième chapitre, nous détaillons les protocoles MAC pour les RCSFs basés sur IR-UWB. Pour une bonne exploitation des avantages d'IR-UWB, plus précisément sa faible consommation énergétique, nous présentons WideMac comme un protocole à ultra faible consommation dédié aux RCSFs basés sur IR-UWB. A la fin de ce chapitre, nous donnons une évaluation énergétique de ce protocole.

Le cinquième chapitre est réservé à la présentation et l'évaluation de notre protocole SWIMAC. Ainsi, il présente les solutions qui y sont incorporées répondant aux problèmes de synchronisation et des messages de diffusion.

Nous concluons notre travail dans le sixième chapitre en discutant les perspectives offertes par ce travail.

## 2.1 Introduction

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) est un ensemble de nœuds communicants, généralement miniatures et capables de fonctionner avec des ressources énergétiques et des capacités de calcul limitées. Ces nœuds appelés aussi capteurs, communiquent entre eux via des antennes et avec la modulation d'une onde radio. Chaque nœud est composé d'un capteur ou d'un actionneur et d'une carte réseau sans fil. Le capteur (ou l'actionneur) est dédié à une tâche bien précise comme un relevé de température, une détection de présence ou la commande d'une électrovanne, etc. L'information produite par le capteur est ensuite passée à la carte réseau du nœud qui la communique généralement via le réseau à une unité de surveillance ou de contrôle.

Le déploiement des capteurs dépend de l'application. Il peut être complètement aléatoire comme dans le cas de la surveillance de sites naturels où le nombre de capteurs est de l'ordre de quelques milliers. Pour d'autres applications, un déploiement peut être bien précis, c'est le cas du suivi d'une activité industrielle où le nombre de capteurs est plutôt de l'ordre de quelques centaines. Le fait que la communication soit sans fil permet d'avoir plus de flexibilité pour le déploiement par rapport à un déploiement filaire qui demande du câblage. Dans certaines applications comme la surveillance à bord d'une frégate, le poids des câbles utilisés devient une surcharge conséquente. Pour les applications nécessitant la mobilité, il ne faut pas remplacer la contrainte du câblage par une solution encombrante ou amenant de l'inertie. Un nœud doit donc résulter d'une volonté d'intégration. Les solutions disponibles à ce jour sont plutôt construites à partir d'un micro-contrôleur relié à une composante spécifique radio. Cet assemblage est un compromis caractérisé par une intégration insuffisante et une capacité limitée de calcul et de mémoire qui se révèle être une contrainte lorsque les protocoles deviennent de plus en plus complexes. Si de plus la solution doit être autonome en énergie, cela a un impact à la fois sur le coût mais aussi sur l'encombrement. Les protocoles réseaux utilisés doivent prendre en compte cette limitation énergétique. En effet, remplacer une entité du réseau ou renouveler ses ressources énergétiques après déploiement devient très coûteux (notamment lorsqu'il s'agit de systèmes embarqués qui demandent d'arrêter le système pour permettre cette intervention) et parfois impossible selon la nature du déploiement (capteurs installés dans des zones de radioactivité par exemple).

La portée des antennes de communication est aussi affectée par cette contrainte énergétique et l'étendue d'un réseau de capteurs dépasse souvent largement la portée des

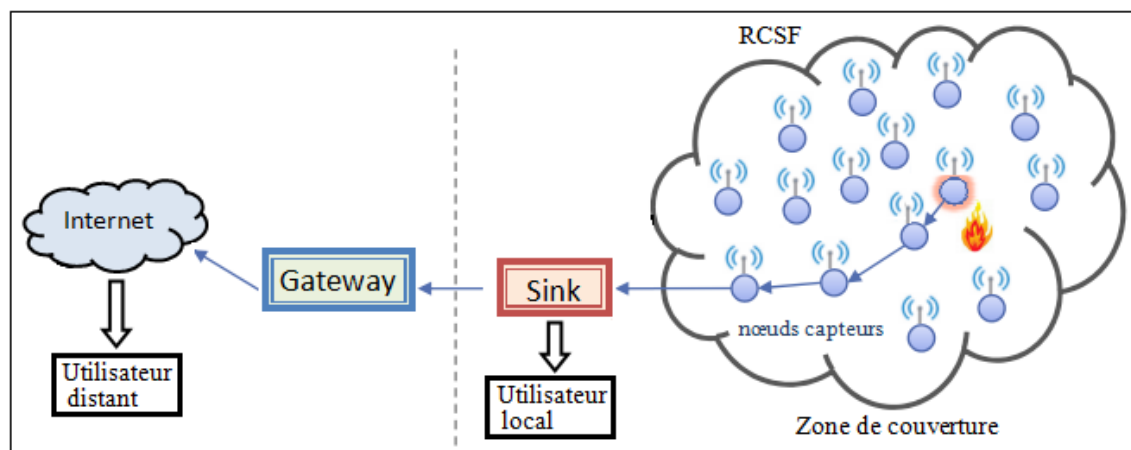


FIGURE 2.1 – Un exemple d'un réseau de capteurs sans fil.

antennes utilisées. Cela force les nœuds capteurs à échanger des messages multi-sauts pour atteindre la destination. La figure 2.1 montre un exemple d'un réseau de capteurs où les nœuds capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données captées vers un nœud appelé nœud collecteur ou puits (sink en anglais), ou station de base (base station). Le puits transmet ensuite ces données par Internet (ou par satellite) via un gateway à l'ordinateur central « Gestionnaire de tâches » pour analyser ces données et prendre des décisions. Ainsi, l'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises, puis récolter les données environnementales captées par le biais du nœud puits. Même en diminuant la puissance de transmission, l'interface radio reste l'équipement le plus consommateur en énergie dans un nœud capteur. Et comme la couche MAC contrôle l'accès au médium c'est-à-dire l'utilisation de cette interface pour transmettre les messages, c'est le protocole MAC qui est le plus concerné par la consommation énergétique dans un réseau de capteurs sans fil.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu un aperçu général sur les RCSFs (WSNs), ses différents domaines d'applications, ses principales familles de protocoles MAC ainsi que ses modèles de communication, de détection et de consommation d'énergie. Ensuite, nous allons présenter les différentes technologies de transmission sans fil utilisées par les RCSFs, les facteurs et contraintes de ce type de réseau et leurs critères de classification. A la fin nous terminerons avec une conclusion.

## 2.2 Architecture d'un nœud capteur

Divers exemple de capteurs existent sur le marché dont les caractéristiques dépendent du type d'application. Nous trouvons à titre d'exemple, les capteurs de température, d'humidité, de pression, d'émissions gazeuses, etc. Même avec cette différence dans leurs caractéristiques, leur architecture matérielle reste similaire. Un capteur est composé principalement d'une unité de : captage, traitement, stockage, communication, et énergie. Des composants additionnels peuvent être ajoutés selon le domaine d'application [1], comme par exemple un système de localisation tels qu'un GPS (*Global Positioning System*), un générateur d'énergie (exemple : cellules solaires) ou un mobilisateur lui permettant de se

déplacer. Ces éléments principaux et optionnels (représentés par les traits discontinus) sont visibles sur la figure 2.2.

1. **Unité d'énergie** : Un capteur est muni d'une source d'énergie, généralement une batterie [2], pour alimenter tous ses composants. Les batteries utilisées sont soit rechargeables ou non. Souvent, dans les environnements sensibles, il est impossible de recharger ou changer une batterie. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs et donc d'un réseau de capteurs.
2. **Unité de captage** : La fonction principale de l'unité de captage est de capturer ou mesurer les données physiques à partir de l'objet cible. Il est composé de 2 sous-unités : le récepteur (reconnaissant la grandeur physique à capter) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique). Le capteur fournit des signaux analogiques, basés sur le phénomène observé, au Convertisseur Analogique/Numérique (*CAN*). Ce dernier transforme ces signaux en données numériques et les transmet à l'unité de traitement. Un capteur peut avoir un ou plusieurs unités de captage [3].

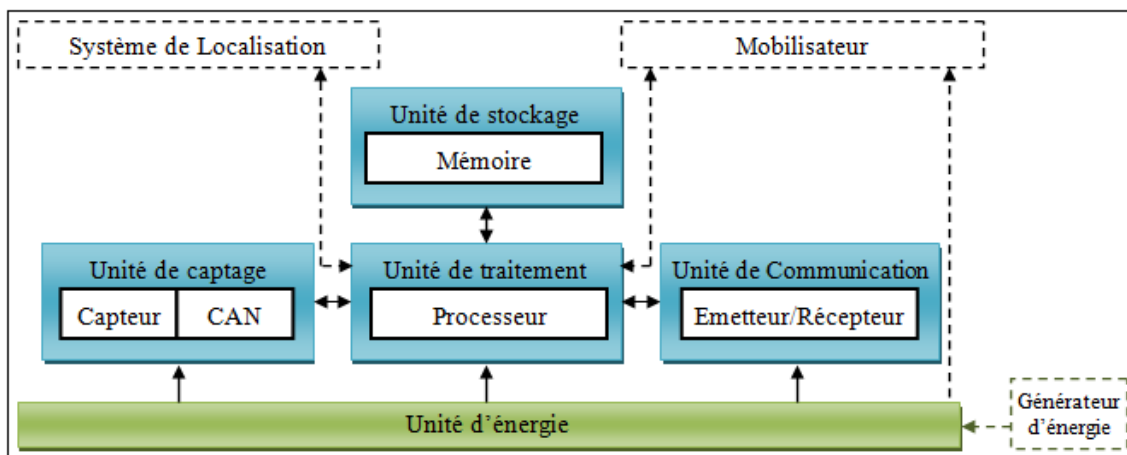


FIGURE 2.2 – Architecture d'un nœud capteur.

3. **Unité de traitements (processeur)** : Elle est composée d'une interface d'acquisition et d'une interface pour l'unité de transmission ainsi qu'un processeur et un système d'exploitation spécifique. Elle acquiert les informations en provenance de l'unité d'acquisition et les envoie à l'unité de transmission. Les types de processeurs qui peuvent être utilisés dans un capteur incluent le Micro-contrôleur, les DSP (*Digital Signal Processors*), les FPGA (*Field Programmable Gate Array*) et les ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*). Parmi toutes ces alternatives, le Micro-contrôleur a été le processeur le plus utilisé pour les capteurs à cause de sa flexibilité à être reliés à d'autres composants (comme par exemple l'unité de communication), à son bon prix et sa faible consommation énergétique [4; 5].
4. **Unité de communication** : Elle permet l'échange de données via un support de communication sans fil. Les différents choix de média de transmission incluent la Radio Fréquence(RF), le Laser et l'infrarouge. Cette unité représente la partie matérielle la plus consommatrice d'énergie. La communauté scientifique du domaine

visé sans cesse l'amélioration du niveau de la consommation d'énergie des technologies employées dans la transmission et affronte les problèmes liés à l'écoute passive ou l'écoute inutile ; la consommation due à ce phénomène reste importante[6].

5. **Unité de stockage(Mémoire)** : Elle inclut la mémoire de programme et la mémoire de données. La taille de cette mémoire est souvent limitée essentiellement par les considérations économiques et elle est en continuelle amélioration au fil des années [7].

### 2.3 Pile protocolaire dans un RCSF

Une pile de protocoles est une mise en œuvre particulière d'un ensemble de protocoles de communication réseau où chaque couche s'appuie sur celles qui sont en dessous afin d'y apporter un supplément de fonctionnalité. Dans le domaine des RCSFs, aucune pile protocolaire n'a été standardisée. Malgré cette non standardisation, la pile protocolaire proposée par [1] est reprise par la majorité des articles scientifiques traitant la thématique des RCSFs . La figure 2.3 illustre cette pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau. La pile comprend la couche physique, la couche liaison de données, la couche réseaux, la couche transport, la couche application, le plan de gestion de l'énergie, le plan de gestion de la mobilité et le plan de gestion des tâches. Suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et bâties sur la couche application [8].

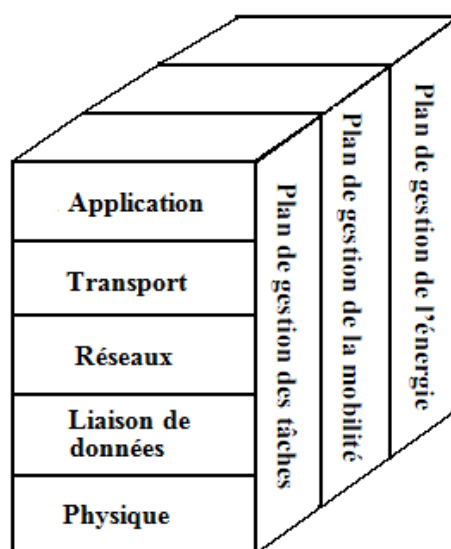


FIGURE 2.3 – Pile protocolaire.

#### 2.3.1 Couche physique

Elle est responsable de la modulation/démodulation, le cryptage/décryptage des informations, la détection du signal, sélection de fréquence et la génération de la fréquence porteuse. Au niveau de Cette couche, la consommation d'énergie peut être affectée par l'environnement de l'application, le choix du type de la modulation ou la bande de fré-

quence utilisée. Il est avantageux en matière d'économie d'énergie que le concepteur de la couche physique choisisse une transmission à multi-sauts plutôt qu'une transmission directe qui nécessite une puissance de transmission très élevée[9].

### 2.3.2 Couche liaison de données

Cette couche est composée de deux sous-couches : la sous-couche LLC et la sous-couche MAC. La première permet de détecter les erreurs des données binaires issues de la couche physique. Tandis que la sous-couche MAC gère les stratégies d'allocation du canal et de mise en veille de l'émetteur-récepteur. Elle influence considérablement la consommation énergétique globale.

#### 2.3.2.1 La sous-couche MAC

La sous-couche MAC [9] est chargée de mettre en œuvre les mécanismes suivants :

- **Les mécanismes d'accès au canal** : ils doivent gérer le contrôle de l'accès et du partage du canal entre les différents nœuds qui désirent communiquer dans un réseau.
- **Les stratégies de mise en veille des capteurs** : ils sont chargés de réduire la consommation d'énergie à travers la mise en veille de l'émetteur-récepteur pour préserver l'état de charge de la batterie. De plus, ces stratégies utilisées dépendent des mécanismes d'accès au canal.
- **Les trames de communications** : elles définissent la mise en forme syntaxique des données issues de la couche physique. Elles permettent entre autre d'initier les communications entre les entités, de gérer les modes de communications ou encore de détecter les éventuelles erreurs introduites par le canal de propagation. Leur mise en œuvre passe généralement par l'insertion de diverses informations (bits additionnels, entêtes, somme de contrôle...) nécessaires au récepteur pour déterminer le début et la fin d'une trame ou chaque champ utile qui la compose (adresse, données, champs de synchronisation). La détection des erreurs introduites par le canal est quant à elle généralement réalisée via une somme de contrôle (checksum en anglais) qui est insérée par l'émetteur et ensuite vérifiée par le récepteur via la couche LLC.

Partant de cette brève description des différents mécanismes employés par la couche MAC, il en résulte qu'un choix judicieux du protocole MAC s'avère nécessaire car ce dernier influence directement la consommation énergétique globale d'un réseau de capteurs.

#### 2.3.2.2 La sous-couche LLC

La sous-couche LLC est responsable du contrôle d'erreurs, a pour rôle de détecter les erreurs des données binaires issues de la couche physique. La technique de contrôle d'erreurs la plus utilisée dans les réseaux RCSF est le «*Forward Error Correction*» (FEC) ; Cette technique comporte de simples mécanismes de codage et de décodage (codes de contrôle d'erreurs simples)[9].

### 2.3.3 Couche réseau

La couche réseau gère les échanges et les interconnexions à travers un RCSF. Elle gère entre autre l'adressage et l'acheminement des données. Le routage dans les RCSFs emploie souvent le multi-sauts du nœud émetteur au nœud « Sink » vu les spécificités de ce type de réseaux. Ainsi, les protocoles de routage classiques des réseaux ad hoc sont inappropriés pour les RCSFs à cause des contraintes d'énergie et de scalabilité[10]. Les métriques considérées dans l'optimisation des coûts des chemins dans les RCSF sont :

- Le temps d'acheminement des paquets.
- L'énergie nécessaire pour transmettre le paquet [9].
- L'énergie disponible dans chaque nœud capteur.

Concernant l'adressage dans les RCSFs, celui le plus utilisé est l'adressage géographique, c'est-à-dire que chaque nœud capteur est identifié dans le réseau par sa position géographique. D'ailleurs, ce type d'adressage est employé notamment dans les applications de surveillance[11].

### 2.3.4 Couche Transport

Cette couche intervient dans la communication entre deux RCSFs ou entre un RCSF et Internet.

Le protocole UDP reste le plus utilisé entre un nœud émetteur et le nœud « Sink ». Entre autre, l'emploi du protocole TCP est évité vu la taille limitée des mémoires des nœuds capteurs qui ne leur permet pas d'enregistrer de grandes quantités d'informations pour la gestion des communications. En plus, les communications entre l'utilisateur(le gestionnaire) et le nœud « Sink » peuvent être gérées par TCP ou UDP via Internet ou satellite.

### 2.3.5 Couche application

Dans cette couche, plusieurs protocoles ont été proposés dans la littérature :

- SMP ou (*Sensor Management Protocol*) permet à l'utilisateur d'exécuter des tâches administratives liées à la configuration du RCSF, la mise en marche/fermeture des nœuds, la synchronisation entre les nœuds, le déplacement des nœuds capteurs.
- SQDDP ou (*Sensor Query and Data Dissemination Protocol*) permet à l'utilisateur d'interroger le réseau en se basant sur la localisation des nœuds[9].

### 2.3.6 Plans de gestion

Le plan de gestion d'énergie gère la manière dont le nœud utilise son énergie. Par exemple, si le nœud capteur est de faible énergie, il pourra informer les nœuds voisins par multicast qu'il ne pourra pas participer dans le routage des paquets.

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

« Sink ».

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

L'intérêt de ces trois plans réside dans le fait qu'ils assurent une gestion optimale de la consommation d'énergie, de la mobilité et des tâches au niveau de chaque nœud capteur. Ces plans de gestion sont nécessaires, de sorte que les nœuds capteurs puissent fonctionner ensemble d'une manière efficace pour préserver l'énergie, router des données dans un réseau de capteurs et partager les ressources entre les nœuds capteurs. Du point de vue global, il est plus efficace d'utiliser des nœuds capteurs pouvant collaborer entre eux. La durée de vie du réseau peut être ainsi prolongée.

## 2.4 Domaines d'application des RCSFs

Les RCSFs rencontrent actuellement plusieurs domaines d'application variés et en expansion continue [12]. L'expansion des domaines d'application est due principalement au support de communication sans fil utilisé, à la miniaturisation des micro-capteurs, la diminution de leur coût, la diversité des types de capteurs disponibles (thermique, optique, de vibrations, etc.). Ils permettent aussi d'étendre les applications existantes et contribuer à faciliter la conception d'autres systèmes industriels. Dans ce contexte, le domaine des applications environnementales reste le premier domaine qui a suscité l'intérêt envers ce type de réseaux. Des exemples d'applications potentielles des RCSFs sont exposés par suite et dans la figure 2.4.

### 1. Applications environnementales :

Les RCSFs peuvent être utilisés dans ce domaine pour surveiller les changements environnementaux [17; 18]. Ils servent à déterminer les valeurs de certains paramètres à un endroit donné, comme par exemple : la température, la pression atmosphérique, etc. En dispersant des nœuds capteurs dans la nature, on peut détecter des événements tels que des feux de forêts, des tempêtes ou des inondations. Ceci permet une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours. Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques, par exemple le semis de nœuds capteurs en même temps que les graines dans les champs agricoles pour pouvoir identifier les zones sèches et rendre l'irrigation plus efficace.

### 2. Applications médicales :

Les RCSFs peuvent être utilisés dans le domaine de la médecine pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau. Ils peuvent aussi faciliter le diagnostic de quelques maladies en effectuant des mesures physiologiques. L'utilisation des RCSFs dans ce domaine peut apporter une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité [19], facilitant ainsi le diagnostic de maladies grâce à des micro-capteurs. Comme applications d'avant garde de ce domaine nous pouvons énumérer :

- Les micro-caméras qui peuvent être ingérées et sont capables de transmettre des

- images de l'intérieur d'un corps humain sans avoir recours à la chirurgie,
- La création d'une rétine artificielle composée d'une centaine de micro-capteurs pour améliorer la vision.

### 3. Applications militaires :

Ce domaine pourra utiliser les RCSFs par exemple dans la détection et la collecte d'informations sur la position de l'ennemi et ses mouvements, la détection d'agents chimiques ou bactériologiques, etc. Le déploiement rapide, l'auto-configuration et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine [13]. Les auteurs de [14; 15], donnent des exemples typiques d'application est le déploiement d'un tel réseau en un endroit stratégique ou difficile d'accès, afin de surveiller toutes les activités des forces ennemies ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes.

### 4. Applications liées à la sécurité :

Dans le domaine de la sécurité, l'application des réseaux de capteurs peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains [16]. Ainsi, l'intégration des capteurs dans les grandes structures peut nous aider à :

- La détection des altérations dans la structure d'un bâtiment, suite à un séisme ou au vieillissement, par des capteurs intégrés dans les murs ou dans le béton,
- La surveillance des mouvements afin de constituer un système de détection d'intrusions distribué. L'aspect distribué rend plus complexe la possibilité de mettre hors d'usage ce système de surveillance.

### 5. Applications écologiques :

L'utilisation des réseaux de capteurs pour optimiser la consommation des ressources énergétiques peut avoir une conséquence environnementale positive, et sur tous dans un contexte où le réchauffement de la planète devient une préoccupation grandissante. Un exemple de ce type d'applications est l'intégration de plusieurs micro-capteurs dans le système de climatisation et de chauffage des immeubles. Ainsi, la climatisation ou le chauffage ne sont déclenchés qu'aux endroits occupés par des personnes présentes et seulement si c'est nécessaire. Le système distribué peut aussi maintenir une température homogène dans les pièces. Utilisée à grande échelle, une telle application permettrait probablement de réduire la demande mondiale en énergie [20].

### 6. Applications commerciales :

Il est possible d'intégrer des nœuds capteurs au processus de stockage et de livraison. Ces nœuds capteurs peuvent être utilisés pour améliorer les processus de stockage et de livraison. Le réseau peut ainsi être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'une marchandise. Un client attendant une marchandise peut alors avoir un avis de livraison en temps réel et connaître la position des marchandises qu'il a commandées [21].

### 7. Applications de localisation :

Les RCSFs peuvent être utilisés pour la localisation des victimes enterrées sous la neige en équipant les personnes susceptibles de se trouver dans des zones à risque par des capteurs. Ainsi, les équipes de sauvetage peuvent localiser plus facilement

les victimes. Contrairement aux solutions de traçabilité et de localisation basées sur le système de GPS (Global Positioning System), les réseaux de capteurs peuvent être très utiles dans des endroits confinés comme les mines par exemple [22].

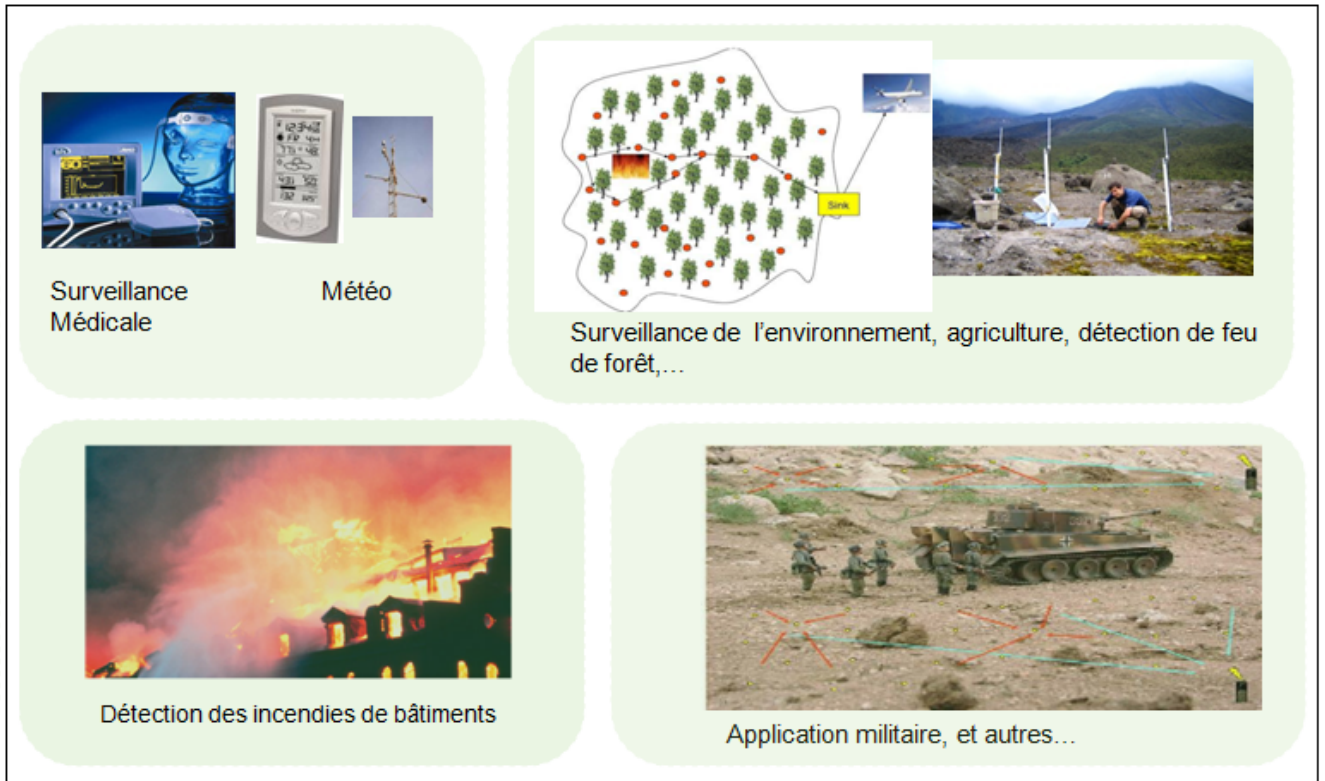


FIGURE 2.4 – Exemples d'applications des RCSFs.

## 2.5 Protocoles de la couche MAC

*Medium Access Control*(MAC) est une sous-couche de la couche *Liaison de données* du modèle OSI (*Open System Interconnexion*). Dans un système sans fil, cette dernière est chargée de mettre en œuvre les mécanismes d'accès au canal, les stratégies de gestion des états de la radio, et la construction des trames de communications. Elle permet en particulier de :

- Gérer l'accès au canal en contrôlant l'activité du module radio en le basculant du mode *inactif* au mode *actif ou émission* lorsqu'un paquet doit être envoyé.
- Configurer les paramètres radio (la bande fréquentielle d'opération), préciser le type et l'ordre de modulation ou la sélection éventuelle d'un schéma de codage,
- Contrôle des données échangées avec la couche physique,
- Incorporation de l'en-tête MAC et des données dans des trames.
- Acquiescement des données reçues en cas de besoin.

Les domaines d'application ainsi que les scénarios de déploiement des RCSFs ont engendré plusieurs spécificités de ce type de réseaux. Ainsi la conception des protocoles MAC pour RCSFs doit tenir compte de ces spécificités et en même temps exploiter les protocoles MAC décrits dans la littérature qui ont été conçus et optimisés pour les scénarios

rios concernant les communications satellite et les réseaux locaux sans fil (WLAN). Les spécificités précitées ont conduit à l'énumération des contraintes suivantes à tenir compte lors de la conception d'un protocole MAC dédié à un RCSF : la conservation d'énergie, la latence, le débit et l'équité ainsi que la fiabilité.

Dans cette section, nous présenterons les protocoles MAC dédiés aux RCSFs suivant leurs méthodes d'accès au canal : CSMA/CA, NP-CSMA-PS, TDMA et méthodes hybrides.

### 2.5.1 Protocoles basés sur CSMA/CA

cette section exposera les protocoles MAC des RCSF se basant sur le mécanisme CSMA/CA. Ainsi, nous décrirons le principe de fonctionnement, quelques avantages et inconvénients des protocoles les plus populaires fonctionnant à base de CSMA/CA.

#### 2.5.1.1 S-MAC

Le protocole S-MAC (*Sensor MAC*) a été proposé parmi les protocoles efficaces en gestion d'énergie. Il utilise le mécanisme RTS/CTS pour pallier au problème des nœuds cachés[23]. Il bascule l'état du nœuds entre l'état actif et de mise en veille (figure 2.5). Les nœuds sont synchronisés et organisés en des clusters virtuels. Chaque nœud diffuse périodiquement le calendrier de ses période d'activité et de mise en veille dans un paquet SYNC destiné aux nœuds du le même cluster. Si un nœud appartient à deux clusters, il doit réaliser un compromis entre les deux calendriers. S-MAC utilise la notion de message passing qui permet aux fragments d'un long message d'être envoyés en rafale. La durée de la transmission est incluse dans les paquets de contrôle RTS et CTS. S-MAC ajoute la durée de la transmission restante dans chaque fragment et dans chaque acquittement, cela permet aux nœuds qui se réveillent au milieu de la transmission de retourner dans l'état de mise en veille.

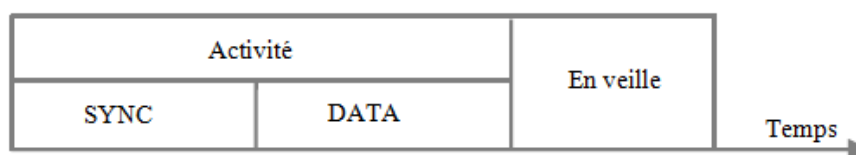


FIGURE 2.5 – La période d'activité et de mise en veille dans S-MAC.

#### Avantages

- Simple implémentation du protocole.
- La perte d'énergie causée par l'écoute au canal libre est réduite par le cycle de mise en veille.

#### Inconvénients

- La communication se déroule uniquement durant la période d'activité, ce qui réduit le débit moyen.
- Le nombre des calendriers sauvegardés dans chaque nœud augmente avec le nombre de nœuds, ce qui limite l'évolutivité de ce protocole.

- Une latence non optimale puisque les messages doivent attendre la période d’écoute pour être envoyés.
- L’utilisation d’une période d’écoute fixe cause l’écoute à un canal libre s’il n’y a pas de données à transmettre pendant cette période.
- La période d’écoute fixe est non adaptative puisqu’elle est fixée avant le déploiement. En plus, le réglage optimal dépend du taux des événements observés qui peut changer avec le temps.

### 2.5.1.2 T-MAC

Le problème de la période d’écoute fixe de S-MAC a été revisité est résolu dans le protocole T-MAC (*Timeout MAC*) [24]. Dans ce dernier, quand il n’y a plus d’activité sur le canal pendant une période adaptative  $T_A$  le nœud termine la période d’écoute. Cette dernière représente le temps minimum d’écoute à un canal libre. La période adaptative à la place de la période fixe contribue à la sauvegarde de l’énergie en minimisant l’écoute à un canal libre (figure 2.6). Cependant, cette technique crée le problème de mise en veille plus

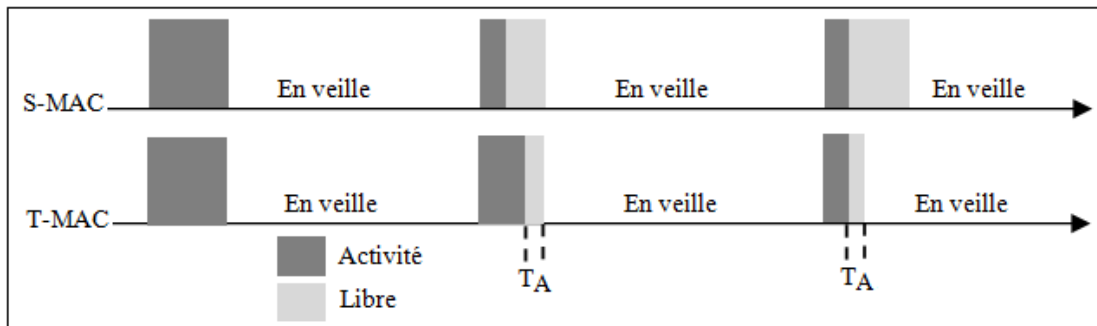


FIGURE 2.6 – La période d’écoute adaptative de T-MAC vs la période d’écoute fixe de S-MAC.

tôt comme explique la figure 2.7 où le trafic est unidirectionnel et les messages circulent de haut en bas.

Considérons le cas où le nœud C qui a entendu le CTS envoyé par B en réponse au RTS de A. C doit rester silencieux pendant la transmission donc il ne communique pas avec D. Puisque D n’a rien entendu et sa période d’écoute est terminée alors il se met en mode sommeil. Quand A termine sa transmission, B émet un paquet d’acquiescement que ses voisins A et C reçoivent. C veut communiquer avec D mais ce dernier étant en sommeil, il ne peut pas recevoir le paquet RTS de C. Une solution est proposée à ce problème en introduisant un paquet de contrôle FRTS (pour Futur Request To Send). Quand le nœud C reçoit le CTS de B, il envoie un paquet FRTS à D qui contient la longueur de la communication en cours. Ainsi, le nœud D peut déterminer qu’il sera ensuite le destinataire d’un paquet RTS et il ne se met pas en mode sommeil. T-MAC ajoute l’information full-buffer-priority. Les nœuds qui ont le buffer plein envoient un message RTS en réponse d’un RTS des autres nœuds.

#### Avantages

- T-MAC conserve davantage l’énergie par rapport à S-MAC puisqu’il évite l’écoute à un canal libre même dans la période d’écoute.

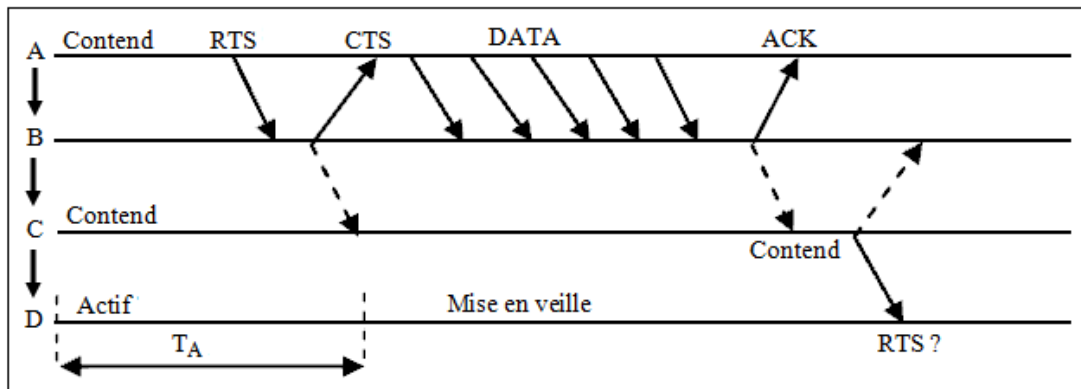


FIGURE 2.7 – Le problème de mise en veille.

- T-MAC est aussi simple que S-MAC.

### Inconvénients

- T-MAC conserve le même problème de non évolutivité.
- La diffusion de paquets n'utilise pas le mécanisme RTS/CTS, ce qui augmente la probabilité de collisions.

## 2.5.2 Protocoles basés sur NP-CSMA-PS

La présente section exposera les protocoles MAC des RCSF se basant sur le mécanisme NP-CSMA-PS (*Non-Persistent Carrier Sensing Multiple Access with Preamble Sampling*). Ce mécanisme utilise l'écoute de la porteuse avec l'accès multiple, sans persistance et avec échantillonnage de préambule. Nous décrirons ainsi le principe de fonctionnement des protocoles les plus populaires utilisant ce mécanisme, et nous présenterons quelques avantages et inconvénients .

### 2.5.2.1 WiseMac

WiseMac [25] est protocole MAC conçu pour le réseau de capteurs sans fil. Il utilise la technique de l'échantillonnage de préambule (Preamble Sampling). Cette technique consiste à échantillonner régulièrement le canal en écoutant sa radio pour une petite durée. une durée commune à tous les nœuds capteurs appelée  $T_W$  est utilisée dans l'échantillonnage du canal. Si le canal est occupé, un nœud continue à écouter jusqu'à ce qu'il reçoive un paquet ou que le canal redevient libre. Au niveau du nœud émetteur, un préambule de réveil précède chaque message pour assurer que le récepteur sera réveillé quand la portion 26 des données du message arrive (figure 2.8). Les nœuds maintiennent l'information sur le décalage entre le calendrier des échantillonnages de leurs voisins et les siens. En connaissant le calendrier de l'échantillonnage du récepteur, le nœud envoie les messages au bon moment avec un préambule de réveil de longueur minimale  $T_P$  comme montré dans la figure 2.8. Ainsi, chaque nœud maintient une table avec les différences des calendriers d'échantillonnage de ses voisins directs. Les paquets d'acquiescement servent à remplir et mettre-à-jour cette table à base de la durée restante pour le prochain échantillonnage du préambule incorporée dans ces derniers.

l'écoute de la porteuse sans persistance est employée par WiseMac pour minimiser les

collisions. Pour reporter les émission, WiseMac utilise un algorithme de backoff qui choisi un entier aléatoire multiplié par le temps de changement d'état de l'unité de communication. Pour prévenir les collisions aussi, un préambule de réservation du médium de durée aléatoire est ajouté avant le préambule de réveil.

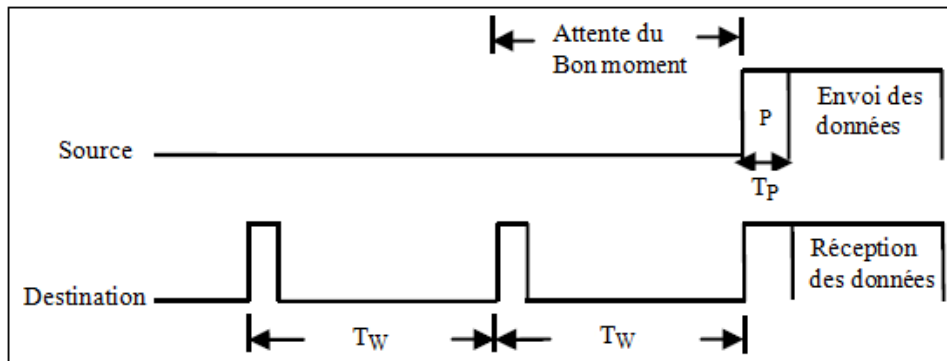


FIGURE 2.8 – Technique de préambule dans WiseMac (P : Préambule).

#### Avantages

- Avec WiseMac, la synchronisation des instants de réveil et d'endormissement des nœuds n'est pas nécessaire .
- WiseMac évite l'overtransmitting en utilisant le préambule de réveil.
- WiseMac consomme moins d'énergie que S-MAC et T-MAC.

#### Inconvénients

- Absence d'une solution au problème des nœuds cachés.
- WiseMac minimise l'écoute au canal libre en augmentant le prix de la transmission et réception.

#### 2.5.2.2 BMAC

Comme WiseMac, BMAC (*Berkeley MAC*) [26] utilise le même principe d'échantillonnage de préambule avec le mécanisme d'écoute à basse puissance ou Low Power Listening (LPL). le nœud émetteur doit envoyer un préambule de longueur plus grande que le cycle d'échantillonnage des nœuds afin de réduire l'écoute à un canal libre. De cette façon, Les nœuds se réveillent périodiquement pour échantillonner le canal, et à la détection d'une activité, ils se réveillent pour recevoir le paquet. En plus, BMAC a implémenté des interfaces qui permettent aux services du réseau d'ajuster les mécanismes employés par ce dernier. A titre d'exemple, ajuster le CCA (*Clear Channel Assessment*), l'acquiescement, le backoff pour paramétrer l'équité d'accès au canal en fonction de la charge du réseau, et l'écoute à basse puissance pour la conservation d'énergie.

#### Avantages

- BMAC est simple, évolutif, flexible et s'adapte aux applications grâce à l'utilisation des interfaces de paramétrage.
- BMAC évite l'overtransmitting en utilisant le préambule de réveil.
- La synchronisation des instants de réveil et d'endormissement des nœuds dans BMAC n'est pas nécessaire .

- L'évaluation de BMAC est faite par des implémentations réelle d'un réseau de capteur sans fil.
- BMAC augmente la capacité utile car il n'utilise pas le mécanisme RTS/CTS.

### Inconvénients

- Absence d'une solution au problème des nœuds cachés.
- BMAC minimise l'écoute au canal libre en augmentant le prix de la transmission et réception et de l'overhead.

## 2.5.3 Protocoles basés sur TDMA

La présente section exposera les protocoles MAC des RCSF se basant sur le mécanisme TDMA (*Time Division Multiple Access*) ou accès multiple à répartition dans le temps. Il permet de découper le temps disponible entre les différentes communications. Par ce moyen, une fréquence (porteuse) peut être utilisée par plusieurs utilisateurs simultanément. Nous décrirons ainsi le principe de fonctionnement des protocoles les plus populaires utilisant ce mécanisme, et nous présenterons quelques avantages et inconvénients.

### 2.5.3.1 TRAMA

Afin d'augmenter l'efficacité d'énergie dans l'utilisation du TDMA classique, le protocole TRAMA (*TRAffic Adaptive Medium Access*) [27] a été proposé comme un nouveau protocole MAC se basant sur le mécanisme TDMA. Il est composé de trois protocoles secondaires : *Neighbor Protocol* (NP), *Schedule Exchange Protocol* (SEP) et *Adaptive Election Algorithm* (AEA). Comme montré dans la figure 2.9, Une trame du protocole TRAMA est divisée en plusieurs slots. Les slots d'accès aléatoire qui apparaissent au début de la trame et les slots de données qui apparaissent à la fin de la trame.

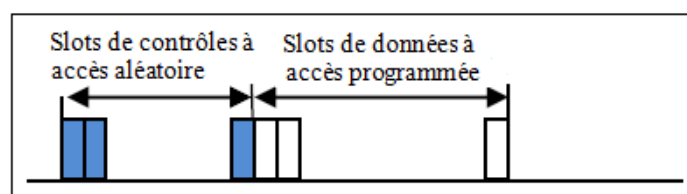


FIGURE 2.9 – Format d'une trame TRAMA.

Dans TRAMA chaque nœud est responsable de déterminer la topologie du réseau pour un voisinage à deux sauts. Ceci est réalisé à base de la liste des voisins à un saut collectée à partir des voisins. Cette liste est propagée dans un slot de contrôle à accès aléatoire géré par le protocole NP. Dans la période d'accès aléatoire, les nœuds utilisent l'écoute à la porteuse pour l'acquisition du canal.

De la même manière, le protocole SEP distribue l'information sur le trafic d'un nœud capteur parmi ses voisins. Il permet à un nœud d'échanger une liste des récepteurs du trafic avec ses voisins.

A l'aide des informations obtenues dans NP et SEP, l'algorithme AEA sélectionne les slots de données à accès programmé pour le transfert de trafic en sélectionnant les

émetteurs et les récepteurs pour réaliser une transmission sans collision.

### Avantages

- Transmission de données sans collision
- Pourcentage plus élevé du temps de sommeil
- TRAMA s’adapte rapidement aux changements de trafic grâce à l’accès aléatoire.
- L’accès programmé aux slots de données limite les collisions des messages et réduit l’énergie nécessaire de l’unité de communication.
- TRAMA supporte plusieurs modèles de communications : unicast, multicast ou broadcast.
- Moins de communication nécessaire pour l’unicast et le broadcast
- La probabilité de collisions est largement inférieure à celle des protocoles CSMA/CA.

### Inconvénients

- Implémentation un peu compliquée de TRAMA.
- Les frais de planification provoque un retard significatif
- TRAMA intègre des sous protocoles et exige des informations sur les voisins à deux sauts, ce qui implique la nécessité d’une grande mémoire et la consommation de plus de ressources.

#### 2.5.3.2 FLAMA

FLAMA (*FLow-Aware Medium Access*) [28] est proposé comme une amélioration de TRAMA. Comme TRAMA, FLAMA divise le temps selon deux modes d’activité : intervalles de temps à accès planifié et intervalles de temps à accès aléatoire. FLAMA a aussi besoin de connaître le voisinage d’un nœud à deux sauts et des informations concernant le flux de données des voisins à un saut. En revanche, FLAMA ne diffuse pas de calendriers de trafic durant les intervalles de temps à accès planifié mais échange durant les intervalles de temps à accès aléatoire des informations par rapport aux flux de données liés à l’application. En outre, FLAMA établit une synchronisation globale du réseau basé sur l’estampillage des trames et une topologie arborescente pour le relais de données.

Pour déterminer les émetteurs et les récepteurs concernés par chaque slot de temps lors de l’intervalle à accès planifié, FLAMA applique un algorithme plus simple que celui utilisé dans TRAMA. Comme TRAMA, FLAMA assure des transmissions sans collision en ne permettant qu’à un seul nœud d’émettre dans un voisinage à deux sauts.

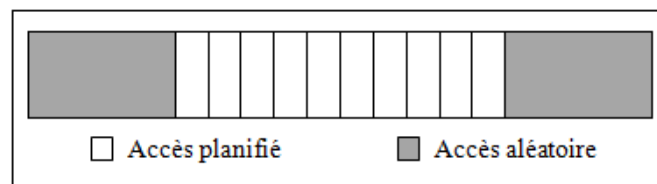


FIGURE 2.10 – Découpage temporel de FLAMA.

### Avantages

- Transmission de données sans collision,
- Pourcentage plus élevé du temps de sommeil,
- Haut débit,

- Algorithme simplifié pour l'élection,
- Une plus grande fiabilité de bout en bout,
- Latence améliorée,

**Inconvénients**

- Les informations de routage codées en dur manque d'évolutivité et d'auto-configurabilité,
- Processus initial de formation de réseau trop long,
- Retard dépendant du nombre de nœuds à deux sauts.

### 2.5.3.3 SMACS

SMACS (*Self-organizing medium access control for sensor network*) [29] est un autre protocole MAC distribué à planification basé sur TDMA. ses auteurs ont développé quatre algorithmes pour s'attaquer aux différents aspects de la question. SMACS offre l'évolutivité via sa capacité d'auto-organisation et permet à un réseau de capteurs de fonctionner dans des conditions très dynamiques, comme pendant le démarrage, l'état stationnaire, et l'échec, ainsi que des scénarios sans assistance. SMACS utilise le système TDMA pour établir des horaires de communication d'émission/réception. En même temps, il emploie une structure de super-trame et une synchronisation temporelle pour la découverte de voisins. En combinant la découverte des voisins et l'attribution de calendrier TDMA, SMACS est en mesure de former un réseau connecté sans besoin de n'importe quel nœud maître local ou global. SMACS réalise également l'économie d'énergie à l'aide d'un horaire de réveil au hasard dans la phase de connexion et en éteignant la radio pendant les créneaux de temps d'inactivité.

**Avantages**

- Évolutivité avec auto-organisation
- Mobilité lente dans un sous-ensemble de nœuds
- Routage robuste pour les réseaux multi-sauts

**Inconvénients**

- Adresser conjointement l'évolutivité, la mobilité, la robustesse du routage multi-sauts ainsi que de l'efficacité énergétique reste un point non abordé dans ce protocole.

### 2.5.3.4 DW-MAC

DW-MAC (*Demand Wakeup Medium Access Control*) [30] est un protocole MAC à cycles de travail synchronisés. Le concept de base de DW-MAC est de réveiller les nœuds sur demande au cours de la période de sommeil d'un cycle pour transmettre ou recevoir un paquet. Il divise son cycle opérationnel en trois étapes : SYNC, DATA et SLEEP. Dans une période de données, les nœuds avec des données en attente de contention pour accès au canal utilisent le protocole CSMA/CA. DW-MAC remplace également RTS/CTS avec une trame de contrôle unique, appelée la trame de planification (SCH :SCHeduling). Elle réserve uniquement l'intervalle de temps proportionnel dans la période SLEEP suivante pour transmettre et recevoir les paquets de données en attente. Aussi il met en place un mappage un-à-un entre chaque période de données et la période de sommeil qui la suit,



effectué dans la période de distribution sans contention en échangeant la séquence FRTS-ACK. Pour les données inter-network, ils les envoient directement au nœud gateway en utilisant RTS-CTS-DATA-ACK.

Le nœud gateway ou le coordinateur du cluster rassemble deux types de demande du trafic : intra-network et inter-network. Le trafic intra-network représente l'échange de messages entre les nœuds dans le même cluster pour l'écoute et la fusion de données. L'émetteur envoie un FRTS au nœud gateway pour réserver un slot dans la période de distribution sans contention. Le trafic inter-network représente les messages qui vont être envoyés par le gateway au réseau extérieur et de ce dernier vers un nœud dans un cluster. Ceci est réalisé par l'échange de la séquence RTS-CTS-DATA-ACK.

GMAC élit périodiquement un nouveau nœud gateway pour distribuer équitablement l'énergie parmi les nœuds en utilisant l'algorithme RAVE (pour *Resource Adaptive Voluntary Election*) qui est basé sur le niveau d'énergie et les ressources mémoire disponibles.

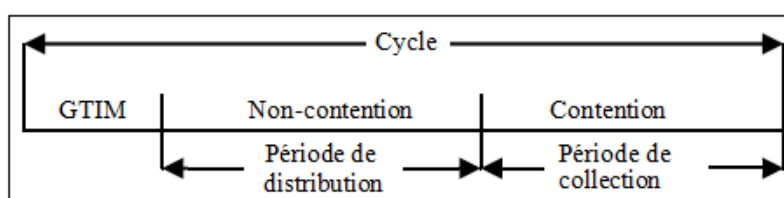


FIGURE 2.12 – La trame de GMAC [31].

### Avantages

- GMAC minimise l'écoute au canal libre plus que dans S-MAC et T-MAC.
- Le pourcentage de mise en veille est très élevé.
- Les deux périodes de GMAC fournissent un réseau à grande échelle, favorisent l'échange équitable de données et utilisent la bande passante d'une manière efficace.

### Inconvénients

- L'hypothèse du réseau à un seul saut et des nœuds qui sont tous dans une même portée de transmission est trop forte.
- Les nœuds doivent avoir des informations sur leurs voisins de même cluster pour différencier entre le trafic inter-network et intra-network.

#### 2.5.4.2 Z-MAC

Z-MAC (*Zebra-MAC*) [32] est un protocole hybride pour les RCSFs. Il est adapté pour des applications où le taux de données attendu et la contention à deux sauts sont moyens ou élevés. La principale caractéristique de Z-MAC est son adaptabilité au niveau de contention dans le réseau, de sorte que sous une faible charge de trafic avec moins de conflits, il se comporte comme un protocole CSMA, tandis que sous une charge de trafic plus lourde avec plus de contentions, il fonctionne comme un protocole ordonnancé à base de TDMA. Comme dans CSMA/CA, avant qu'un nœud ne transmette dans un slot, il écoute la porteuse et transmet quand le canal est libre. Mais, le propriétaire du slot a plus de priorité que les autres pour accéder au canal. Mais, quand un slot n'est pas utilisé par son propriétaire, les autres peuvent le prendre. Ce système de priorité bascule

entre CSMA/CA et TDMA explicitement et en fonction du niveau de contention. Sous une contention faible, les nœuds non propriétaires du slot sont permis à transmettre dans n'importe quel slot avec une petite priorité. Ils appellent ce mode *Low Contention Level* (LCL). Et quand un nœud commence à sentir plus de contention (détecté par les pertes répétées des paquets d'acquittements), il passe en mode *High Contention Level* (HCL) où il ne peut pas s'activer dans les slots de ses voisins à deux sauts.

#### Avantages

- Z-MAC offre une adaptabilité rapide aux différentes charges de trafic,
- Robuste pour les conditions de canal instationnaire, attribution des slots, échecs et modifications de topologie,
- Le mécanisme hybride de CSMA/CA et TDMA économise beaucoup d'énergie.
- Les collisions sont plus évitées dans Z-MAC que dans les protocoles basés sur CSMA/CA.

#### Inconvénients

- l'attribution des slots et la synchronisation peut entraîner des coûts élevés surtout avec les changements importants fréquents du réseau,
- La synchronisation des nœuds reste un problème à cause de la grande densité des nœuds dans les réseaux de capteurs.
- L'overhead est augmenté à cause du maintien du mécanisme d'accès TDMA.

#### 2.5.4.3 AS-MAC

AS-MAC (*Asynchronous Scheduled MAC*) [33] est un protocole de synchronisation cyclique qui combine de manière innovante le mécanisme CSMA de contention révisé et une approche unique de planification pour créer un protocole MAC à planification adaptative hybride. Son but est d'atténuer la latence engagés dans DW-MAC, et en même temps de réduire la consommation d'énergie de plus augmenter le taux de livraison de paquets pour les réseaux de capteurs multi-sauts. AS-MAC hérite des caractéristiques uniques de DW-MAC, comme le double-rôle (RTS / CTS) des paquets de contrôle, et une fonction de mappage proportionnelle, et adopte le mécanisme T-MAC pour créer le temps actif élastique (RAT : Resilient Active Time). Les mécanismes de base d'AS-MAC comprennent (1) chaque cycle de fonctionnement complet est divisé en trois périodes : la période de synchronisation, la période de planification adaptative (AS : Adaptive Scheduling), et la période de sommeil. (2) Les nœuds se disputent des intervalles de temps au cours de la période de planification adaptative pour planifier la transmission de données et utilisent un certain délai pour réaliser le temps actif élastique pour la période AS. (3) Le réveil de la demande au cours de la période de repos d'un cycle de fonctionnement pour transmettre ou recevoir des paquets de données. AS-MAC améliore la fonction de mappage proportionnelle one-to-one qui détermine l'instant de réveil et de transmission de données d'une paire de nœuds dans la période de sommeil, et assure une transmission de paquets d'acquittement sans collision pour le scénario à deux sauts, comme c'est illustré dans la figure 2.13.

Ces mécanismes de base permettent aux protocole AS-MAC de proroger de manière adaptative la longueur de la RAT afin de permettre aux nœuds de programmer plus de transmissions de données au sein d'un cycle de fonctionnement lorsque la charge de

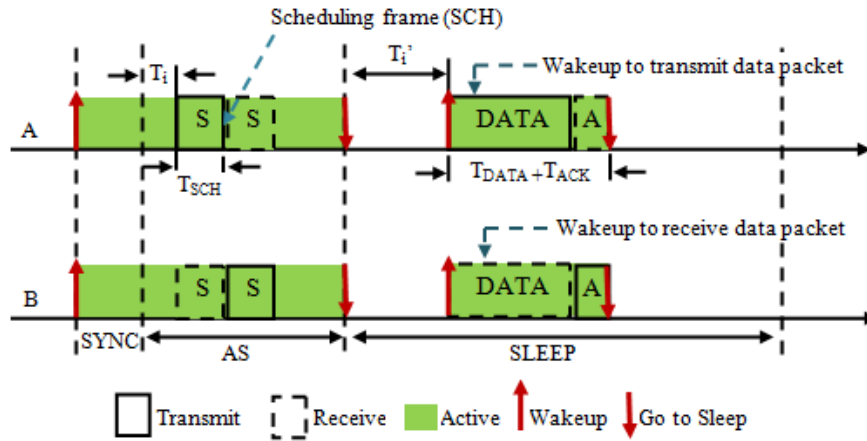


FIGURE 2.13 – Mappage proportionnelle un-à-un du protocole AS-MAC

trafic est en augmentation, et de raccourcir la longueur de la RAT et aller se coucher tôt lorsque la charge de trafic est décroissante. Ainsi, AS-MAC a une forte adaptabilité aux variations de charge du trafic. Les résultats des expériences montrent qu'il est en avance sur certains protocoles existants en termes de performance pour les deux scénarios unicast et broadcast. Surtout sous une charge de trafic unicast lourde, AS-MAC peut réduire les délais de bout en bout d'environ 65% et réduire la consommation d'énergie d'environ 40% par rapport à DW-MAC, tout en gardant un taux de livraison de paquets de près de 100%.

### Avantages

- Réalise une très haute efficacité énergétique, taux de livraison de paquets et faible latence de bout à bout dans les RCSFs multi-sauts, en particulier pour un trafic unicast élevé et un trafic de diffusion faible à moyen,
- Adaptabilité aux différentes charges de trafic.

### Inconvénients

- Pour un réseau de grande taille, il faut soigneusement ajuster certains paramètres pour obtenir de meilleures performances pour le trafic de diffusion.

## 2.6 Modèle de communication

Le canal de communication utilisé influence directement les performances d'un système de communication sans fil. Dans un RCSF, la modélisation de la communication s'avère très difficile car les nœuds communiquent à faible puissance et par conséquent les liaisons radio sont très peu fiables. La figure 2.14, illustre une liaison unidirectionnelle  $n_j \rightarrow n_i$  basée sur le modèle "binary disc". Ce modèle est le plus simple des modèles déterministes de communication, ainsi est le plus souvent utilisé dans la littérature scientifique pour faciliter les calculs analytiques. Il suppose que chaque nœud  $n_i$  est capable de transmettre ses données à tout nœud se situant dans son disque de rayon de communication noté  $r_i$ .

Le rayon de communication de chaque nœud varie en fonction du niveau de sa puissance de transmission. De ce fait, on pourra dire que deux nœuds  $n_i$  et  $n_j$  peuvent commu-

niquer symétriquement si et seulement si la distance Euclidienne entre eux est plus petite que ou égale au minimum de leurs rayons de communication (i.e.  $d(n_i, n_j) \leq \min(r_i, r_j)$ ). La communication entre les nœuds est donc basée sur de pures considérations géométriques. Selon ce modèle, la perte ou l'atténuation de puissance du signal noté  $PL(d)$  (y compris les gains des antennes) est une fonction déterministe  $PL_0(d)$  de la distance  $d$  entre les nœuds.  $PL_0(d)$ , exprimé en  $dB$ , est de la forme :

$$PL_0(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.2)$$

Avec :

$d$  : est la distance entre l'émetteur et le récepteur,

$n$  : est le coefficient d'affaiblissement de propagation,

$d_0$  : la distance de référence,

$PL(d_0)$  : est l'atténuation dû à l'affaiblissement à la distance de référence  $d_0$ .

La puissance du signal reçu ( $Pr$ ), à une distance  $d$ , est la puissance sortie de l'émetteur ( $Pt$ ) moins l'affaiblissement de propagation  $PL(d)$ , c'est à dire :

$$Pr = Pt - PL_0(d) \quad (2.3)$$

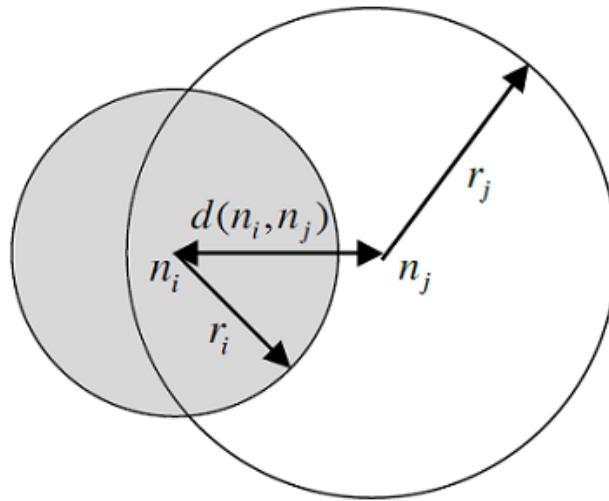


FIGURE 2.14 – Modèle de communication : "binary disc model".

La présence de certains éléments tels que l'environnement, le terrain, les obstacles ou encore la mobilité des nœuds peuvent engendrer plusieurs phénomènes physiques (interférences, diffraction, réflexion, etc.) qui dégradent la qualité du signal dans les applications de RCSF. Ainsi, certaines études ont suscité des modèles statistiques de propagation radio prenant en compte ces différents phénomènes physiques. Comme exemple on donne les modèles suivants :

- Le modèle "log-normal shadowing path loss" tient compte des effets de shadowing et de trajets multiples,
- Le modèle "Signal-to-Noise Ratio" (SNR) tient compte des bruits de fond sur le signal,

- Le modèle "*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*" (SINR) prend en compte les effets d'interférences et de bruits sur le signal.

Dans le cas du modèle "*log-normal shadowing path loss*" [34], l'affaiblissement de propagation à une distance  $d$  noté  $PL(d)$  est exprimé comme suit :

$$PL(d) = PL_0(d) + X_\sigma = PL(d_0) + 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2.4)$$

où les expressions  $d_0$ ,  $d$ ,  $n$ , et  $PL(d_0)$  ont été définies précédemment,  $X_\sigma$  est une variable gaussienne de moyenne nulle (en dB) avec un écart-type  $\sigma$  pour modéliser l'effet du shadowing.

Le bruit de fond est considéré aussi dans la détermination du comportement de la communication radio. Dans le cas où les antennes de l'émetteur et du récepteur ont la même température ambiante [34], ce bruit est :

$$P_n = (F + 1)kT_0B \quad (2.5)$$

où  $F$  est le facteur de bruit,  $k$  la constante de Boltzmann,  $T_0$  la température ambiante et  $B$  la bande passante du bruit. Pour une puissance  $P_t$  sortie de l'émetteur, le  $SNR$  à une distance  $d$  est donné comme suit :

$$SNR(d) = P_t - PL(d) - P_n \quad (2.6)$$

Toutes les puissances exprimées en dB, où l'expression de  $PL(d)$  est la même que celle du modèle "*log-normal shadowing path loss*" défini précédemment.

Les auteurs de [35] donnent un modèle qui suppose qu'un nœud ne peut pas correctement recevoir un signal même s'il est proche de l'émetteur à cause des effets d'interférences et de bruits. De ce fait, si  $P_r(n_i)$  désigne la puissance du signal reçu par un nœud  $n_j$  en provenance d'un nœud  $n_i$ , et  $N$  désigne la densité du bruit, alors le nœud  $n_j$  reçoit correctement le signal si le ratio de la puissance du signal reçu et la somme des puissances du bruit et des interférences est supérieur à un certain seuil  $SINR_\theta$ . C'est à dire :

$$\frac{P_r(n_i)}{N + \sum_{n_k \in \Psi \setminus n_i} P_r(n_k)} \geq SINR_\theta \quad (2.7)$$

où  $\Psi$  désigne l'ensemble de tous les nœuds.

## 2.7 Modèle de détection

Le modèle "*binary disc*" est le plus simple des modèles de détection. Il suppose qu'un nœud est capable de détecter seulement les phénomènes se trouvant dans sa portée de détection. Dans ce modèle, la portée de détection de chaque nœud est confinée dans un disque circulaire de rayon  $r_d$  appelé rayon ou portée de détection.

Les auteurs de [36] proposent le modèle probabiliste "*probabilistic sensing model*" comme une extension du modèle "*binary disc*" (figure 2.15). Ce modèle probabiliste reflète le comportement incertain de détection des nœuds capteurs comme les capteurs infrarouges ou ultrasons. Dans un tel modèle, si  $r_u$  définit une zone de détection incertaine

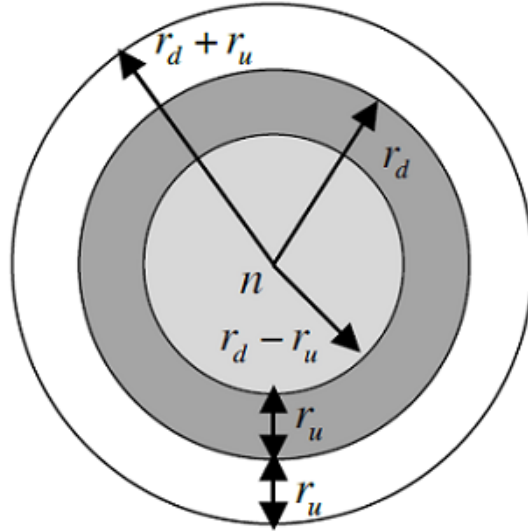


FIGURE 2.15 – Modèle de détection : "Probabilistic sensing model".

d'un capteur  $n$  tel que  $r_u < r_d$  alors un nœud pourrait détecter avec une probabilité  $p$  un point ou un objet se situant dans un intervalle compris entre  $r_d - r_u$  et  $r_d + r_u$ .

La probabilité de couverture d'un point  $P(x_i, y_i)$  par un capteur  $n_i$  est donnée comme suit :

$$C_{X_i Y_i}(n_i) = \begin{cases} 0, & r_d + r_u \leq d(n_i, P) \\ e^{-wa^\beta} & r_d - r_u < d(n_i, P) < r_d + r_u \\ 1, & r_d - r_u \geq d(n_i, P) \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec :

$$a = d(n_i, P) - (r_d - r_u) \quad (2.9)$$

Où  $w$  et  $\beta$  sont des paramètres qui mesurent les probabilités de détection d'un objet se trouvant à une certaine distance d'un nœud capteur. Dans ce cas, on pourra dire que tous les points :

- Sont 1-couverts par un nœud capteur donné s'ils se trouvent à une distance inférieure à  $(r_d - r_u)$  de ce nœud capteur,
- Ont une couverture ( $< 1$ ) qui décroît exponentiellement avec la distance, dans le cas où ils se trouvent dans l'intervalle  $[r_d - r_u, r_d + r_u]$ ,
- Sont 0-couverts ou non couverts, au-delà d'une distance  $(r_d + r_u)$ .

## 2.8 Modèle de consommation d'énergie

Comme montre la figure 2.16, l'énergie totale consommée par un nœud capteur est due essentiellement aux opérations suivantes : la capture, la communication (transmission et réception) et le traitement. Elle dépend aussi du type spécifique du nœud. Par exemple dans [37], les auteurs ont montré que les caractéristiques d'un nœud *Mote-Class* sont complètement différentes de celles d'un nœud *Stargate*. L'expression de cette énergie est donnée par la formule suivante [38] :

$$E_{total} = E_{capture} + E_{transmission} + E_{reception} + E_{traitement} \quad (2.10)$$

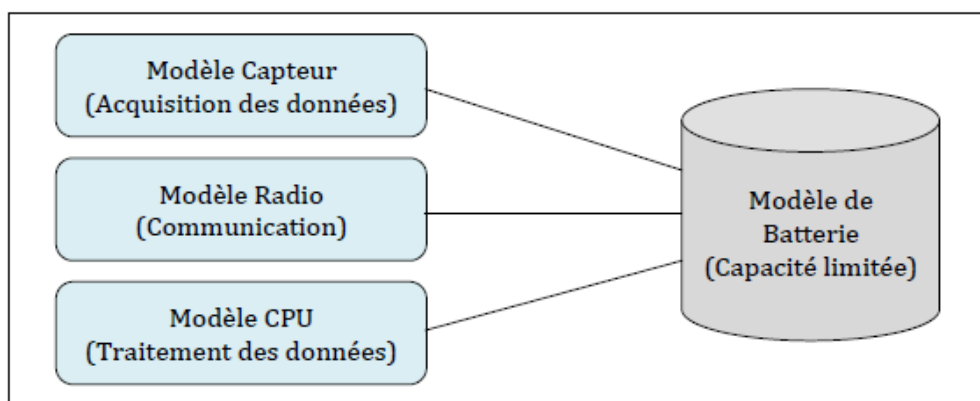


FIGURE 2.16 – Modèles consommateurs de l'énergie d'un nœud capteur.

### 2.8.1 Énergie de capture

C'est l'énergie consommée par un nœud capteur pour réaliser les tâches suivantes : échantillonnage, traitement de signal, conversion analogique/numérique et activation de la sonde du capteur. Le coût de cette énergie dépend du type spécifique du capteur (image, son, température, etc.) et des tâches (échantillonnage et conversion des signaux physiques en signaux électriques, conditionnement des signaux et conversion analogique-numérique, etc.) qui lui sont assignées. Cette énergie consommée n'est pas très importante, car elle représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommée par un nœud [39].

### 2.8.2 Énergie de communication

L'énergie de communication se décline en deux parties : l'énergie de transmission et l'énergie de réception. Elle est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance. Quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Cette énergie est beaucoup plus élevée que celle dissipée par l'unité de traitement.

Les auteurs de [40] montrent que la transmission d'un bit d'information peut consommer autant que l'exécution de quelques milliers d'instructions. Le modèle le plus simple et le plus utilisé pour estimer uniquement l'énergie consommée par un nœud pour transmettre une donnée à un autre nœud se trouvant à une distance  $d$  est donné comme suit [41; 42] :

$$E(d) = d^\alpha + c \quad (2.11)$$

Avec :

$\alpha \geq 2$  est l'exposant d'affaiblissement de propagation en fonction de l'environnement,  
 $c \geq 0$  est une constante qui représente l'énergie nécessaire pour transmettre une quantité d'information donnée.

Ce modèle simpliste se contente simplement d'estimer la consommation d'énergie en trans-

mission alors qu'un nœud consomme aussi de l'énergie en réception et même lorsqu'il est au repos ou en écoute sans réception.

On distingue 4 modes de fonctionnement (émission "Tx", réception "Rx", "idle" ou écoute sans communication, et "sleep" ou sommeil) et un état de transition entre les modes de fonctionnement "Switch". Pour un nœud donné, le coût d'énergie pour chacun de ses modes de fonctionnement est noté respectivement  $E_{Tx}(k, P_{out})$ ,  $E_{Rx}(k)$ ,  $E_{Idle}$ ,  $E_{Sleep}$  et  $E_{Sw}$ , où  $k$  représente la longueur du message.

L'énergie consommée pour émettre un message de  $k$  bits sur une distance  $d$  est donnée (figure 2.17) par la formule suivante :

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx}(k) + E_{Tx-amp}(k, d). \quad (2.12)$$

La formule suivante donne l'énergie consommée pour recevoir un message de  $k$  bits :

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k \quad (2.13)$$

Les énergies consommées en mode *Idle*, *Sleep* et *Switch* sont données par :

$$E_{Idle} = C_{Idle} \cdot V_B \cdot T_{Idle} \quad (2.14)$$

$$E_{Sleep} = C_{Sleep} \cdot V_B \cdot T_{Sleep} \quad (2.15)$$

$$E_{Sw} = C_{Sw} \cdot V_B \cdot T_{Sw} \quad (2.16)$$

Avec :

$E_{Tx-amp}$	le bit d'information de phase du burst,
$k$	le nombre de chips par burst,
$d$	la séquence d'étalement durant le $k$ -ième symbole,
$E_{elec}$	l'allure temporelle de l'impulsion transmise
$V_B$	représente la tension fournie par la batterie,
$C_{Idle}$	l'intensité du courant pour le mode Idle,
$C_{Sleep}$	l'intensité du courant pour le mode Sleep (sommeil),
$C_{Sw}$	l'intensité du courant pour le mode Switch,
$T_{Idle}$	le temps entre la fin d'une communication (émission ou réception) et le début d'une prochaine,
$T_{Sleep}$	le temps passé par le nœud en mode sommeil,
$T_{Sw}$	le temps de commutation de mode.

### 2.8.3 Énergie de traitement de données

Cette énergie est consommée par un nœud capteur lors de l'activation de son unité de traitement de données (opérations, lecture/écriture en mémoire, etc). En général, les données traitées par les RCSFs sont de type scalaire (température, humidité, vitesse du vent, etc.). Alors, L'énergie consommée pour les opérations de calcul est beaucoup plus faible que l'énergie de communication. En plus, l'énergie nécessaire pour transmettre 1kb sur une distance de 100m est approximativement équivalente à l'énergie nécessaire pour exécuter

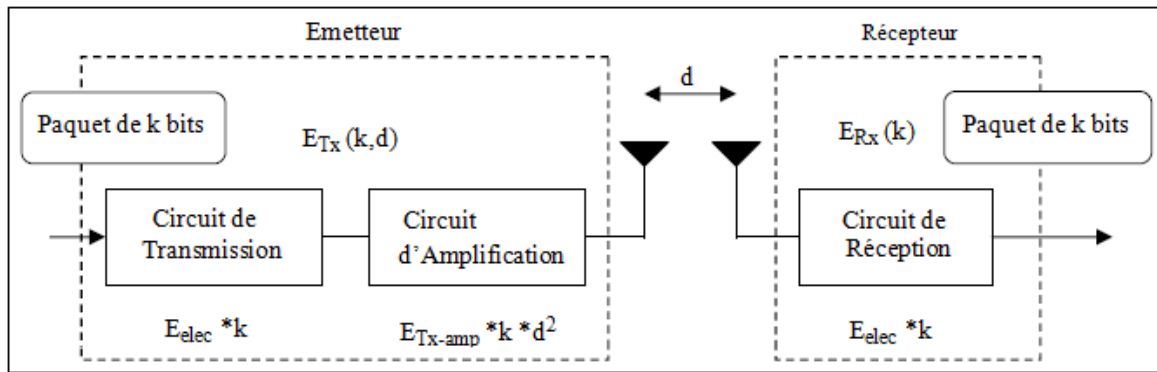


FIGURE 2.17 – L'énergie consommée par un nœud capteur pour l'émission et la réception d'un message de  $k$  bits.

3 millions d'instructions avec une vitesse de 100 millions d'instructions par seconde[43].

La figure 2.18, montre l'énergie consommée pour chaque état et pour chaque action réalisée par le nœud capteur. On voit clairement que la tâche de transmission est la plus consommatrice de énergie suivie de celle de la réception, alors que la tâche de capture et celle du traitement sont peut être négligeables.

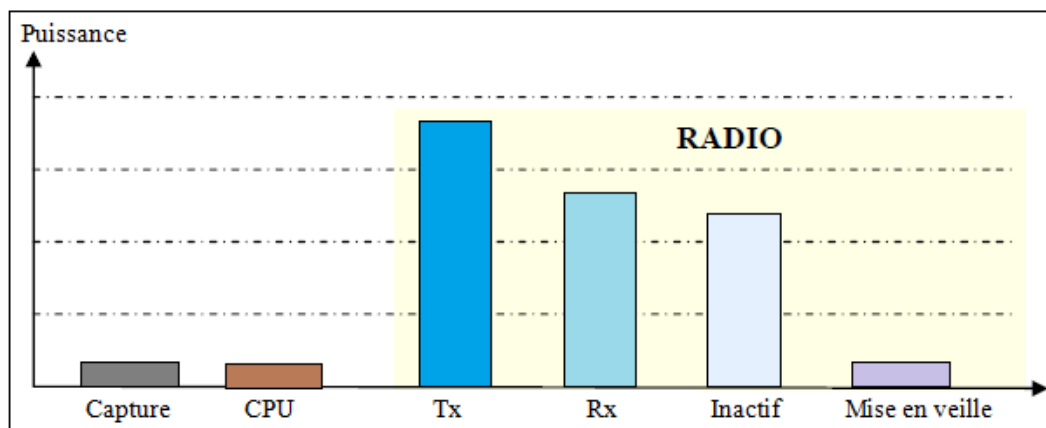


FIGURE 2.18 – Consommation de l'énergie par un nœud capteur.

## 2.9 Technologies de transmission sans fil pour les RCSFs

L'exploitation des avancées technologiques dans les RCSFs, ont permis de développer un nouveau domaine de recherche. Parmi les technologies les plus aptes à être exploitées dans les RCSFs on trouve : Bluetooth et Zigbee.

Bluetooth [44] avait pour objectif préalable de permettre des communications pour les WPAN, c'est-à-dire des communications sur de courtes distances avec un débit de communication limitée. Ses caractéristiques ont ainsi retenu l'attention des développeurs de capteurs. Pour exemple les capteurs *BtNode* sont conçus pour une communication de type Bluetooth. Pour autant, Bluetooth n'est pas le plus utilisé dans les RCSFs, car il est gravement handicapé par la taille limitée du réseau. Cette limite est incompatible avec la

volonté de former des réseaux denses de capteurs.

Zigbee combiné avec IEEE 802.15.4, offre des caractéristiques qui répondent encore mieux aux besoins des réseaux de capteurs [45]. Zigbee offre des débits de données moindres, mais il consomme également nettement moins que Bluetooth. Un petit débit de données n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas soutenues et conséquentes. Malgré tout, la tendance actuelle des constructeurs est d'employer des technologies propriétaires qui ont pour avantage d'être spécifiquement optimisées pour une utilisation précise, mais qui ont comme gros inconvénient de ne pas être compatibles entre elles.

De nouvelles technologies vont influencer considérablement l'avenir des réseaux de capteurs. La radio impulsionnelle UWB en est un très bon exemple [46]. Cette technologie de transmission permettra d'atteindre des niveaux de consommation extrêmement bas grâce à sa simplicité au niveau matériel. De plus, l'atténuation du signal engendré par des obstacles est moindre qu'avec les systèmes radio à bande étroite conventionnels. Sous une approche temporelle, le principe de base de cette nouvelle technologie repose sur l'émission d'un signal fortement limité dans le temps «une impulsion» à l'inverse d'un signal bande étroite dont l'émission se fait en continu.

Un signal radio impulsionnelle UWB présente une large occupation spectrale comparée à un signal à bande étroite qui comme son nom l'indique occupe une étroite bande de fréquence à l'image de Bluetooth ou ZigBee. En plus, dans le cas d'applications mettant en œuvre une technologie de type radio impulsionnelle UWB, l'augmentation de la largeur de bande du signal se fait au détriment de la DSP (*Densité Spectrale de Puissance*) émise afin de garantir la coexistence entre systèmes.

## 2.10 Facteurs et contraintes des RCSF

La conception et la réalisation des RCSFs sont influencées par plusieurs paramètres. Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture de ce type de réseaux peuvent être résumés comme suit :

1. *Consommation d'énergie* : Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie des capteurs est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de sa batterie. Dans un réseau de capteurs (multi-sauts) chaque nœud collecte des données et les envoie au puits via ses voisinages. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un re-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation.
2. *Bande passante limitée* : Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.
3. *Contraintes matérielles* : En plus de l'énergie, la principale contrainte matérielle est la taille du capteur, puisque les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement

et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse.

4. *Topologie dynamique* : Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie à cause de son changement au cours du temps pour les raisons suivantes :
  - Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles, la défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.
  - L'expiration de la durée de vie d'un nœud capteur à cause de l'expiration de son énergie.
  - La mobilité des nœuds capteurs et des stations de base sont mobiles.
5. *L'échelle* : Le nombre de nœuds déployés pour un projet peut atteindre des milliers. Dans ce cas, le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues.
6. *Agrégation de donnée* : Les RCSFs étant assez denses en général, cela signifie que des nœuds assez proches en terme de distance peuvent capter les mêmes données. Ces données sont très corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'informations redondantes. La réduction de la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau et ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données. Avec cette technique, les nœuds intermédiaires agrègent l'information reçue de plusieurs sources.

## 2.11 Classification des RCSFs

En fonction des exigences imposées par chaque type d'application, il existe plusieurs critères pour classer les réseaux de capteurs [47; 48]. En effet, pour chaque type d'application, ces réseaux ont des caractéristiques différentes. Ils se distinguent par le mode d'acquisition et de livraison des données au puits, la distance entre les nœuds capteurs et le puits, le modèle de mobilité dans le réseau, les capacités des nœuds du réseau, etc.

### 1. Selon le mode d'acquisition et de livraison des données au puits :

Le modèle d'acquisition et de livraison des données au puits (Sink) dépend de l'application et de ses exigences pour ce type de réseaux. Il peut être :

- Continu (time-driven),
- Événementiel (event-driven),
- A base de requête (query-driven),
- Hybride.

Concernant le modèle continu, les nœuds doivent périodiquement réveiller leurs émetteurs pour envoyer les données captées au puits. Ce type de modèle est très utilisé dans le cas des applications de type "surveillance" où le but principal est d'avoir une information régulière de la zone surveillée. Dans le modèle orienté événements, les capteurs envoient leurs mesures seulement lorsqu'il y a un événement

qui se produit. Ce type de modèle est recommandé pour les applications de surveillance d'évènements critiques où le but principal est l'obtention d'une information sur l'évènement le plus rapidement possible. Dans le modèle orienté requêtes, les capteurs mesurent des phénomènes et stockent ces mesures dans leur mémoire. Ils envoient ces mesures seulement lorsqu'ils reçoivent des requêtes de la station de base. Le modèle hybride est une combinaison des trois modèles précédents.

## 2. Selon la distance entre les nœuds capteurs et le puits :

Dans ce cas, on distingue les réseaux à un seul saut (Single-hop WSN) des réseaux à multi-sauts (multi-hop WSN). Dans un réseau de capteur à un simple saut, les nœuds capteurs communiquent directement avec le puits. Ils envoient alors leurs données captées directement au puits sans passer par aucun autre nœud intermédiaire. Dans le cas où la distance entre quelques nœuds capteurs et le puits dépasse leur portée maximale, ces nœuds doivent utiliser d'autres nœuds intermédiaires pour envoyer leurs données au puits. Dans ce cas on dit qu'on a un réseau à multi-sauts. Ce type de réseau a une large gamme d'application mais est difficile à mettre en œuvre [48].

## 3. Selon le modèle de mobilité dans le réseau :

L'intérêt de la mobilité dans les RCSFs est multiple dans la mesure où les capteurs mobiles peuvent permettre d'étendre la couverture d'un réseau ou encore obtenir des résultats plus précis. La classification selon le modèle de mobilité consiste en une combinaison entre la mobilité des nœuds capteurs et celle du puits. Par cette combinaison, nous pouvons distinguer deux grandes catégories de réseaux : réseaux statiques et réseaux dynamiques ou mobiles. On peut par exemple avoir un réseau constitué d'un ensemble de nœuds capteurs mobiles et d'un puits fixe. Le but de tels réseaux est la plupart du temps l'exploration de zones inaccessibles ou dangereuses.

## 4. Selon les capacités des nœuds du réseau :

Dans cette classification, on distingue les réseaux homogènes des hétérogènes [48; 49]. Dans un réseau de capteurs homogène, tous les nœuds du réseau sont identiques en termes d'énergie et de complexité du matériel. Il est évident que les nœuds leaders des clusters sont surchargés avec des tâches supplémentaires et nécessaires, comme l'agrégation des données et la coordination du protocole de routage, par conséquent, leur durée de vie expire avant celle de ses autres nœuds. Pour cela les nœuds tournent le rôle du leader du cluster périodiquement entre elles. Dans le cas d'un réseau de capteurs hétérogène il y a quelques nœuds sophistiqués qui ont plus de capacité de traitement et de communication que les nœuds normaux. Cela améliore l'efficacité énergétique et prolonge la vie de réseau.

## 2.12 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil apportent une perspective intéressante : celle de réseaux capables de s'auto configurer et de se gérer sans qu'il y ait besoin d'interventions humaines. De plus, les critères de performance pour un réseau de capteurs diffèrent de ceux des réseaux classiques et donc les solutions à apporter sont nouvelles. En effet, les capteurs sans fils ont vocation à devenir des objets "banaux" et donc doivent pouvoir s'utiliser facilement, tout en gardant une transparence du réseau vis-à-vis de l'utilisateur.

Nous trouvons beaucoup d'applications des RCSFs, surtout dans celles qui n'exigent pas des débits élevés. La réalisation de tel type de réseaux requiert la mise en œuvre de techniques développées pour les réseaux ad hoc ; cependant, la plupart des protocoles développés pour ceux-ci ne sont pas transposables tels quels aux RCSFs.

Les réseaux de capteurs sans fil constituent un axe de recherche très fertile et nous leurs trouvons des applications variées et dans plusieurs domaines. Cependant, il y reste encore de nombreux défis à relever afin de pouvoir les utiliser dans des cas réelles. Pour les réseaux de capteurs de type surveillance par exemple, la problématique majeure est la consommation d'énergie, car les capteurs sont dotés d'une capacité énergétique limitée. Le but des recherches dans ce type de réseaux est de concevoir des protocoles de communication qui permettent de prolonger la durée de vie du réseau le maximum possible sans changer les piles des capteurs. Comme ça, et pour mieux optimiser l'utilisation de la batterie d'un nœud, il faut gérer de façon optimale les états des transmetteurs radio de sorte que les utilisations et les pertes en énergie soient minimales. Ce but peut être atteint en mettant en mode d'endormissement la radio du capteur la plupart de temps. Ceci engendre le problème de la synchronisation des nœuds et la répartition des périodes de réveil. Et puisque l'état de la radio est géré par les protocoles de la couche MAC, il faut donc une conception judicieuse de ces protocoles pour permettre aux nœuds d'avoir des phases de sommeil, tout en ne nuisant pas trop à la communication.

Après avoir présenté les technologies de transmission sans fil utilisées dans les RCSFs, le reste de cette thèse va s'intéresser spécialement à la nouvelle technologie IR-UWB et ses applications dans les RCSFs. L'intérêt porté à celle-ci est dû à ses multiples avantages et spécificités qui a rendu prometteuse son application dans le domaine des RCSFs. Comme récapitulation, c'est une technologie basée sur l'émission d'ondelettes sur des temps très courts ( $< 1\text{ns}$ ) et présentant de nombreux avantages : faible complexité, faible sensibilité aux non linéarités de la chaîne d'émission/réception, robustesse vis-à-vis des évanouissements sélectifs en fréquence et des interférences entre symboles, et caractérisée par son ultra faible consommation pour les débits exigés en particulier par des applications à base de RCSFs. Le détail de cette nouvelle technologie et sa standardisation seront présentés dans le chapitre suivant.

### 3.1 Introduction

Depuis 1901, Guglielmo Marconi utilisait une technologie pour transmettre le code morse à travers l'atlantique [50]. Cette technologie est connue aujourd'hui par le nom UWB (*Ultra Wide Band*). Henning Harmuth, Gerald Ross et K. W. Robins du département de la défense des Etats-Unis d'Amérique [51] ont trouvé des applications de cette technologie dans le domaine des radars et des communications depuis 1960. Depuis les années 60 son utilisation était limitée aux militaires et aux applications du Département de la Défense dans le cadre des programmes classés secret telles que les communications hautement sécurisées [51]. Cependant, l'avènement des microprocesseurs et des semi-conducteurs dans le domaine des communications a rendu cette technologie répandue chez le grand public et a permis depuis les années 90 sa commercialisation. Et c'est à partir de là que le problème de sa réglementation a été confronté. Et ce n'est qu'en février 2002 que la commission fédérale des communications FCC (*Federal Communications Commission*) a approuvé le premier rapport pour l'usage commercial de la technologie UWB avec l'émission de signaux UWB dans la bande de fréquence  $[3.1GHz - 10.6GHz]$  pour les communications sans fil avec un niveau de puissance très faible ( $-41.3dBm/MHz$ ) [50]. Cette faible puissance permet la coexistence de l'UWB avec d'autres technologies radio à bande plus étroite et améliore aussi la sécurité des signaux UWB transmis.

Les travaux de Robert Scholtz étaient les premiers à avoir abordé publiquement la radio impulsionnelle UWB. Elle a été introduite en 1993, lors de la publication dans la conférence Milcom [52]. Cependant, l'utilisation de l'impulsion pour la transmission de l'information est bien antérieure à cette date. En plus, la radio impulsionnelle trouve ses fondements dans les principes des systèmes radars [53].

Les systèmes UWB présentent un compromis entre débit et portée de communication, ce qui nous donne deux caractéristiques techniques : Un système de communication à haut débit (802.15.3a) sur des distances assez courtes (de l'ordre de  $200Mbps$  pour  $10m$ ), et un système à bas débit (802.15.4a) sur des distances pouvant atteindre les  $100m$  avec de bonnes capacités de positionnement et un débit de l'ordre de  $2Mbps$ . Les applications de type WSN (*Wireless Sensor Network*) trouvent naturellement leur place dans cette approche bas débit tant en termes de portée et de débit qu'en terme d'économie d'énergie inhérente au caractère impulsionnel de l'UWB.

A travers ce chapitre, nous proposons de revenir sur l'historique de l'UWB et sur ces atouts majeurs pour le domaine des télécommunications ainsi que sa réglementation. Puis,

nous présenterons la technologie radio impulsionnelle UWB, puisque c'est la base de nos travaux sur les réseaux de capteurs sans fil. Nous allons voir ses avantages, ses techniques de modulation, les modèles de canal de propagation utilisés, les systèmes d'émission ainsi que les principales architectures de réception dédiés à cette technologie. En plus, nous présenterons un aperçu du standard IEEE 802.15.4a qui est à ce jour le seul standard proposé comme couche Physique (PHY) basée sur une approche impulsionnelle. Et comme une concrétisation des avantages et atouts de cette technologie, nous présenterons notre travail qui a permis l'évaluation des performances d'IR-UWB pour les RCSFs, et nous terminerons le présent chapitre par une conclusion.

## 3.2 Présentation de l'UWB

### 3.2.1 Définition du signal UWB

Selon la FCC, l'UWB est toute technologie radio utilisant une bande passante  $B$  dépassant 20% de la fréquence centrale  $f_c$  ou une bande de fréquence d'au moins  $500\text{MHz}$  [50]. Par contre, les systèmes dont les bandes sont étroites (NarrowBand : NB), leur spectre ne dépasse pas 1% de la fréquence centrale, et entre les deux, nous trouvons les systèmes dont le spectre est large bande (Wideband : WB) qui est entre 1% jusqu'à 20% de la fréquence centrale [50]. Par ailleurs, nous présentons dans la figure 3.1 les bandes NB, WB et UWB. Ces bandes sont alors classées en utilisant les expressions suivantes :

$$\begin{cases} B_f &= \frac{B}{f_c} = 2 \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} \\ B &= f_h - f_l \\ f_c &= \frac{f_h + f_l}{2} \end{cases} \quad (3.1)$$

où  $B_f$  est la bande passante fractionnelle.  $f_l$  et  $f_h$  sont respectivement les fréquences de

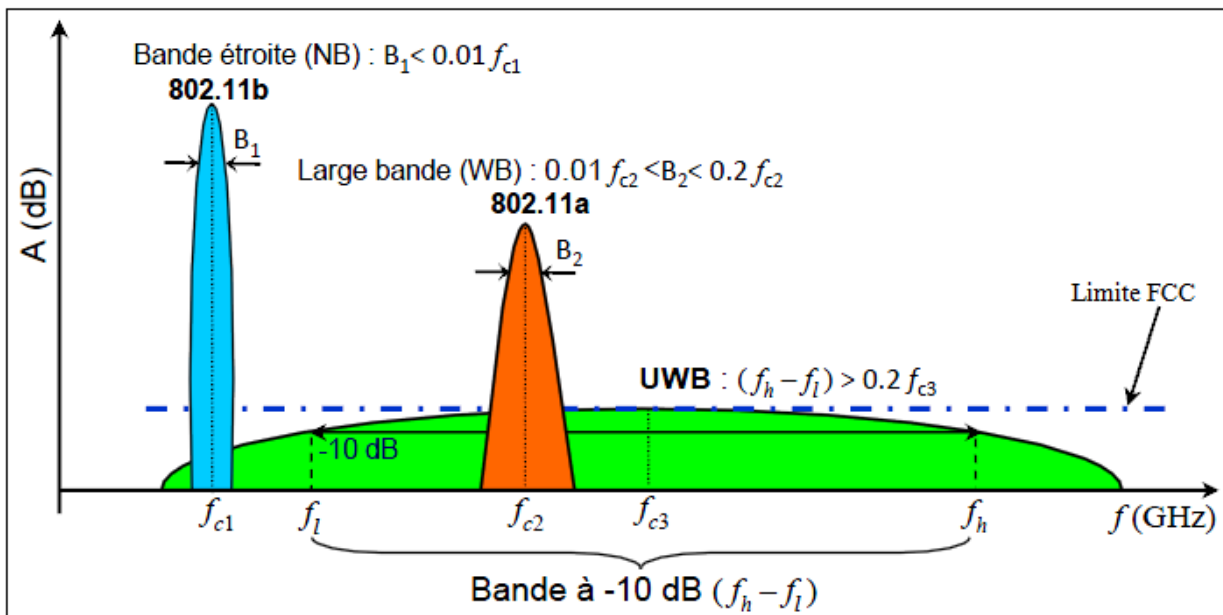


FIGURE 3.1 – Classification des signaux selon leurs spectres.

coupure inférieure et supérieure calculées à  $-10\text{dB}$ .

En plus, le spectre a été limité différemment sur plusieurs bandes pour protéger les autres systèmes radio. Dans les systèmes de communications classiques avec porteuses, la fréquence centrale  $f_c$  est la même que la fréquence porteuse  $f_0$ . D'autre part, dans les systèmes UWB, la fréquence centrale  $f_c$  peut être approximée par  $\frac{1}{T_p}$  dans le cas où l'impulsion contient une seule période, avec  $T_p$  est la durée de l'impulsion. Pour mieux illustrer cette affirmation, la figure 3.2 présente l'effet de la durée de l'impulsion sur le spectre. Elle montre que lorsque la durée de l'impulsion est courte, la bande spectrale  $B$  devient large et la fréquence centrale  $f_c$  augmente [54].

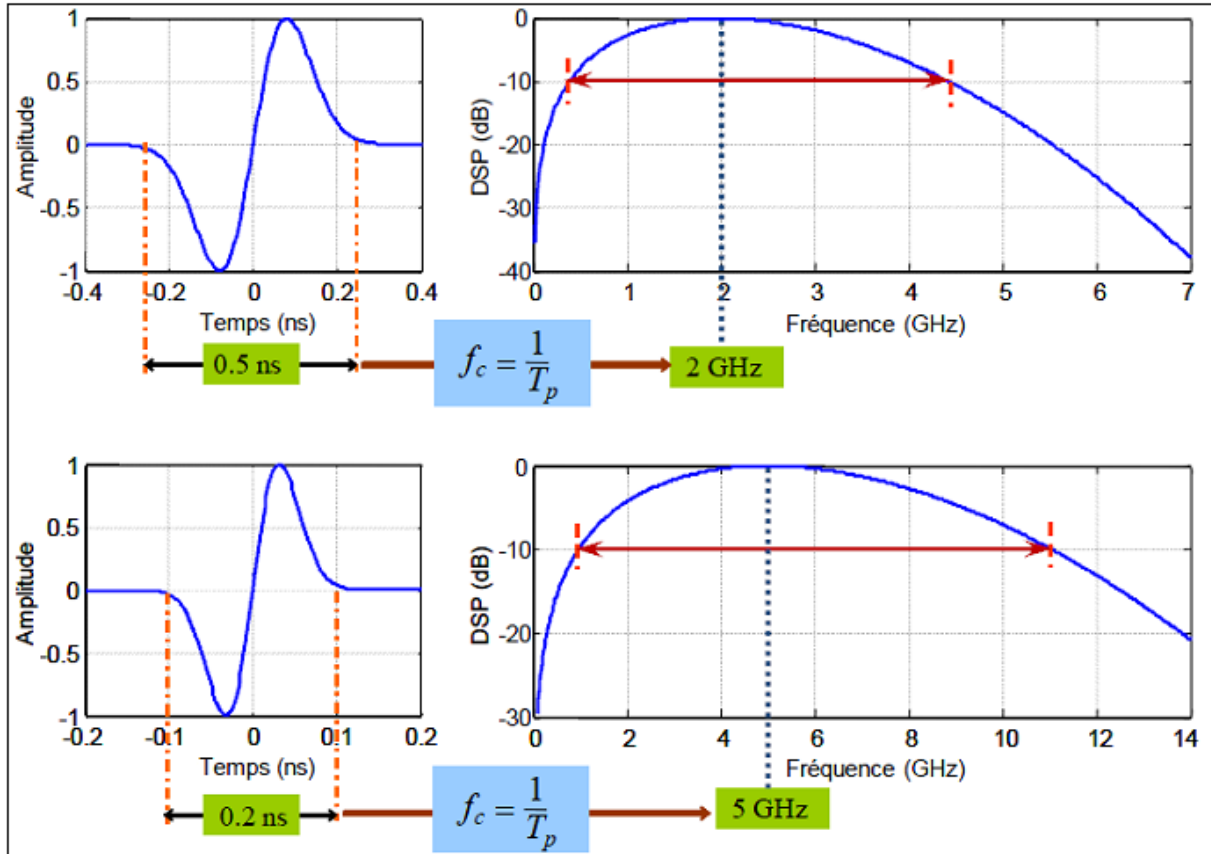


FIGURE 3.2 – Spectres larges pour impulsions brèves.

### 3.2.2 Utilité de l'UWB

Les technologies radio, présentant une large bande permettent de proposer des débits adéquats pour un contexte de demande croissante de systèmes de communications à très haut débit. Dans [55], on retrouve une bonne synthèse des caractéristiques qui ont suscité un intérêt croissant porté à la technologie UWB :

1. *Excellente résolution temporelle* : Du fait d'une très grande largeur de bande des signaux UWB, ils disposent d'un très fort pouvoir de résolution temporelle, de l'ordre de la nanoseconde. L'intérêt de cette propriété peut être exploité pour la localisation.
2. *Forte robustesse face aux évanouissements* : Cette propriété est issue des trajets multiples qui constituent le canal de propagation, et qui peuvent être additionnés

de façon constructive. Cela confère au système UWB une bonne robustesse face aux évanouissements associés aux trajets multiples, et généralement rencontrés dans les systèmes à bande étroite.

3. *Faible densité spectrale de puissance* : La densité spectrale de puissance des signaux UWB a été limitée par la FCC à  $-41.3\text{dBm}/\text{MHz}$ , dans la vision de favoriser la coexistence de l'UWB avec d'autres technologies radio à bande plus étroite. Bien qu'elle améliore la discrétion des communications radio, cette faible puissance d'émission réduit la portée des signaux UWB.
4. *Réduction de la sensibilité au brouillage* : Le faible niveau de leur puissance d'émission réduit la nuisance des systèmes UWB sur les autres systèmes. Néanmoins, le brouillage occasionné par les systèmes à bande étroite sur les signaux UWB peut être atténué du fait de la grande largeur de bande.
5. *Simplicité des systèmes* : Les systèmes UWB impulsionnels peuvent transmettre sur le canal radio des signaux impulsionnels générés en bande de base. Par contre les architectures classiques nécessitent des oscillateurs et des transpositions en fréquence pour transmettre le signal. Donc les architectures UWB seront moins complexes que les systèmes radio conventionnels.
6. *Bonnes propriétés de pénétration des obstacles dans la bande basse* : Plusieurs applications peuvent bénéficier d'une excellente résolution, telles que la vision au travers des murs, la poursuite d'objet ou la localisation.

### 3.2.3 Régulation de l'UWB

Au niveau de la définition d'un nouveau système de communication, les organismes de réglementation doivent agir afin de réglementer l'utilisation des ressources spectrales, afin d'assurer une coexistence entre les différents systèmes qui y ont accès. La demande de plus en plus des systèmes à haut débit avec un spectre fréquentielle assez saturé imposent aux nouvelles technologies d'utiliser des bandes les plus étroites possibles avec des fréquences assez hautes. C'est la raison pour laquelle quelques systèmes ont envisagé l'utilisation de hautes fréquences centrées sur  $60\text{GHz}$ . Toutefois, on aura des grandes difficultés de réalisation qui soient à coût réduit. L'UWB de son côté permet d'opérer sur des fréquences inférieures à  $10\text{GHz}$  ce qui permet d'envisager d'autres solutions intéressantes.

Afin d'optimiser l'utilisation du spectre et de pouvoir contrôler les interférences avec d'autres existants systèmes, les comités de réglementation en Europe et aux États-Unis ont imposé des règles restrictives pour le fonctionnement des équipements UWB. La figure 3.1 présente une comparaison entre le taux d'occupation du spectre ainsi que la puissance de transmission entre les systèmes à bande étroite et celui à large bande, dont la densité spectrale de puissance doit satisfaire des masques prédéfinis par la commission de réglementation comme indiqué sur figure 3.3 et figure 3.4.

Aux États-Unis, la FCC qui est l'organisme de réglementation du spectre pour les usages commerciaux, privés, amateurs ou étatiques, exige que les systèmes UWB doivent occuper au moins  $500\text{MHz}$  de largeur de bande entre les fréquences  $3.1-10.6\text{GHz}$  tout en respectant le masque de puissance déjà évoqué. La puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) ne doit pas dépasser les  $-43\text{dBm}/\text{MHz}$  afin d'éliminer au plus les interférences

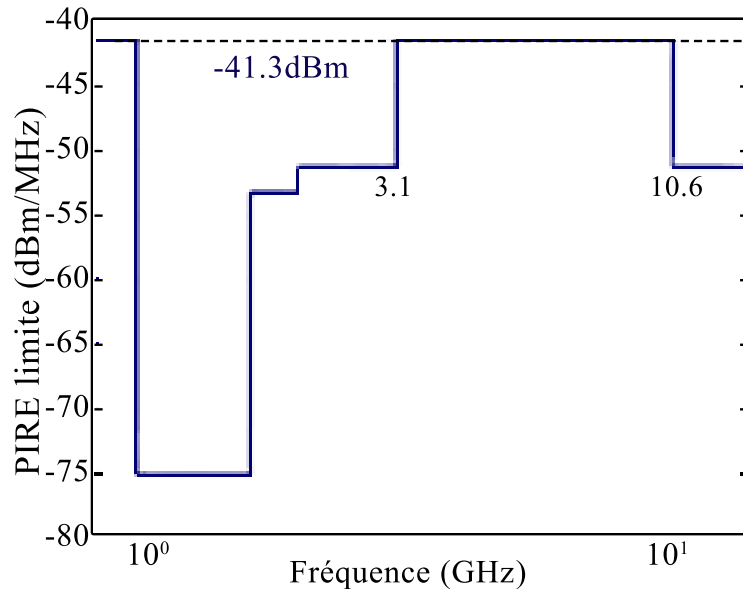


FIGURE 3.3 – Masque FCC pour l'émission des signaux UWB en indoor.

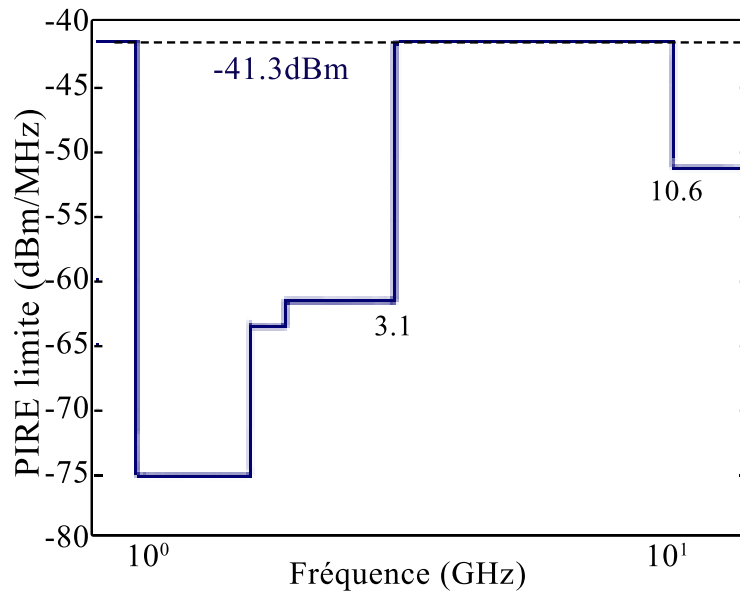


FIGURE 3.4 – Masque FCC pour l'émission des signaux UWB en outdoor.

avec d'autres systèmes utilisant la même bande que l'UWB, ce qui correspond à une mesure de champ électromagnétique de  $500\mu V/m$  dans chaque  $1MHz$ , à une distance de  $3m$  de l'antenne émettrice. Par exemple, les réseaux cellulaires tolèrent une densité spectrale de puissance de transmission jusqu'à  $+30dBm/MHz$  ce qui équivaut à  $10^7$  fois la densité de puissance permise par l'UWB. les communications UWB sont devenus autorisées pour les applications indoor comme pour les environnements outdoor pour les liaisons mobiles point à point.

Pour le continent européen, l'institution responsable de la réglementation est l'Institut Européen des Standards de Télécommunications ETSI, qui travaille depuis l'année 2001 à développer un standard européen pour les systèmes UWB. Quand à l'ERO (*European Radiocommunications Office*), il a pour but de faciliter les échanges entre l'ETSI et la

Conférence Européenne des administrations des Postes et Télécommunications (CEPT) qui est chargé d'analyser l'effet que peut avoir l'UWB sur les systèmes existants, et de prendre les décisions finales sur la réglementation du spectre. Comme première étape, l'ETSI a proposé une adaptation du masque de la FCC en un masque dont les transitions sont progressives afin de mieux protéger les autres systèmes opérant en dehors de la bande  $3.1 - 10.6\text{GHz}$  sans toutefois toucher aux performances de l'UWB sur cette bande. Ceci dit, la limite en puissance dans le cas indoor est la même que celle imposée par la FCC, alors que pour le cas outdoor, l'ETSI prévoit une limite plus stricte en ajoutant une marge de  $20\text{dB}$  par rapport à celle de la FCC, soit une valeur de  $-61.3\text{dBm/MHz}$ .

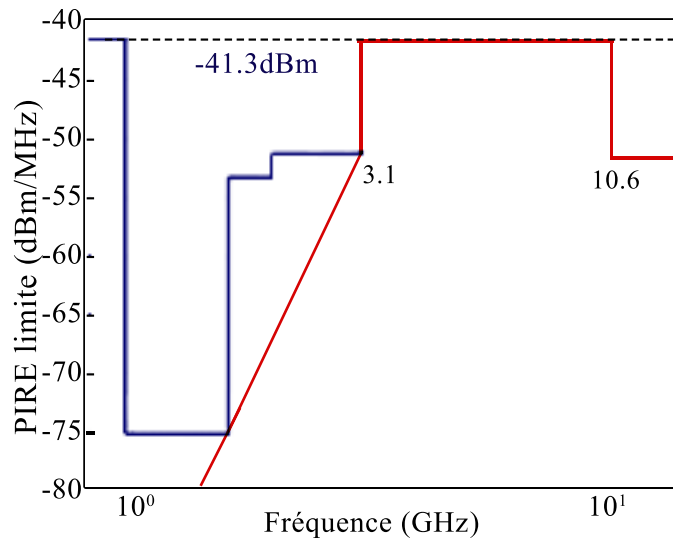


FIGURE 3.5 – Masques d'émission des systèmes UWB.

En Asie, L'autorité IDA (Infocomm Development Authority) a autorisé à partir de Février 2002, la date dans laquelle la FCC a publié son rapport, l'émission des signaux UWB pour période d'expérimentation de 2 ans. Toutefois, un masque d'émission plus favorable que celui imposé par la FCC, sauf qu'il était un peu limité à une zone géographique assez réduite à Singapour. Ceci était pour but de faire quelques étude sur la coexistence de l'UWB avec les applications existantes en vue d'une réglementation antérieure. Une autre réglementation était faite au Japon, par l'institution en charge de réglementation des télécommunications qui est le ministère de l'intérieur et de la communication (MIC), qui a repris les mêmes contraintes imposées par la FCC ( $-41.3\text{dBm/MHz}$ ), sauf que les fréquences autorisées étaient limitées à la bande  $3.4 - 4.8\text{GHz}$  et  $7.25 - 10.25\text{GHz}$ .

### 3.3 Radio Impulsionnelle UWB

L'idée de la Radio Impulsionnelle UWB est inspiré du principe des systèmes Radar qui repose sur l'émission d'impulsions de durée très brève (quelques centaines de picosecondes) [56]. Ces impulsions doivent respecter le masque d'émission en puissance imposé par la FCC. Pour cette raison, plusieurs formes d'impulsion ont été proposées [57].

L'expression mathématique d'une impulsion Gaussienne, notée  $g(t)$ , définie par son

énergie  $\varepsilon_G$  et son écart-type  $\tau$  est de la forme :

$$g(t) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_G}{\sqrt{\pi}\tau}} \times \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \quad (3.2)$$

Par l'application de TF, on obtient sa représentation fréquentielle notée  $G(f)$  :

$$G(f) = \sqrt{2\varepsilon_G\sqrt{\pi}\tau} \times \exp\left(-\frac{(2\pi f\tau)^2}{2}\right) \quad (3.3)$$

Il est plus fréquent d'utiliser les dérivées de (3.2) dont la première s'appelle communément le monocycle Gaussien. En effet, les dérivées de la Gaussienne ont l'avantage de ne pas présenter de composante continue, ce qui limite les ondes stationnaires indésirables dans les antennes lors de l'émission. Les dérivées  $n^{\text{mes}}$  successives de la Gaussienne s'obtiennent récursivement à partir de l'expression suivante :

$$g^{(n)}(t) = -\frac{n-1}{\tau^2}g^{(n-2)}(t) - \frac{t}{\tau^2}g^{(n-1)}(t) \quad (3.4)$$

Et la représentation spectrale de (3.4) s'écrit :

$$G^{(n)}(f) = (i2\pi f)^n \sqrt{2\varepsilon_G\sqrt{\pi}\tau} \times \exp\left(-\frac{(2\pi f\tau)^2}{2}\right) \quad (3.5)$$

Les figures 3.6 et 3.7, donnent l'allure des quatre impulsions ainsi que leurs spectres pour  $\tau = 0.1ns$ . Ces figures montrent que le choix de la forme de l'impulsion est primordial dans le but de contenir le spectre de cette dernière dans le masque d'émission.

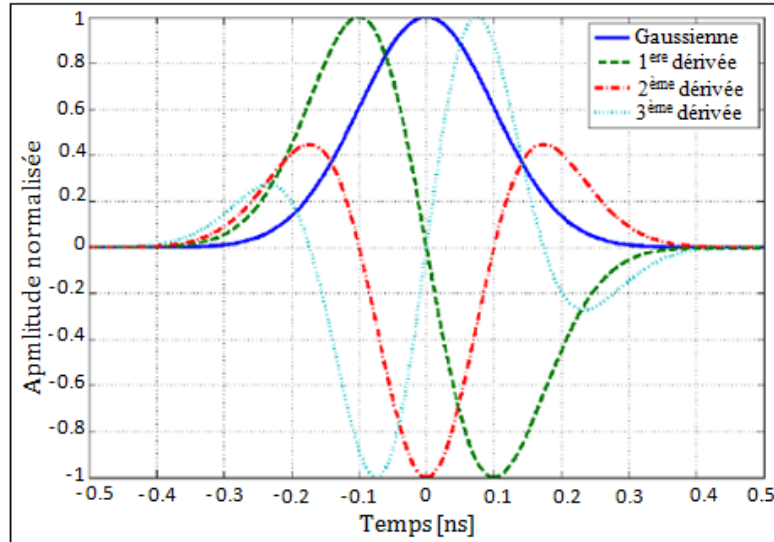


FIGURE 3.6 – Représentations temporelles de l'impulsion gaussienne et ses 3 premières dérivées.

Une dérivée d'ordre élevée est indispensable pour occuper la bande de la FCC. Dans le cas des applications de type portable (handheld), il faut au moins une septième dérivée de Gaussienne pour ne pas avoir une DSP en dehors du masque de la FCC sans pour

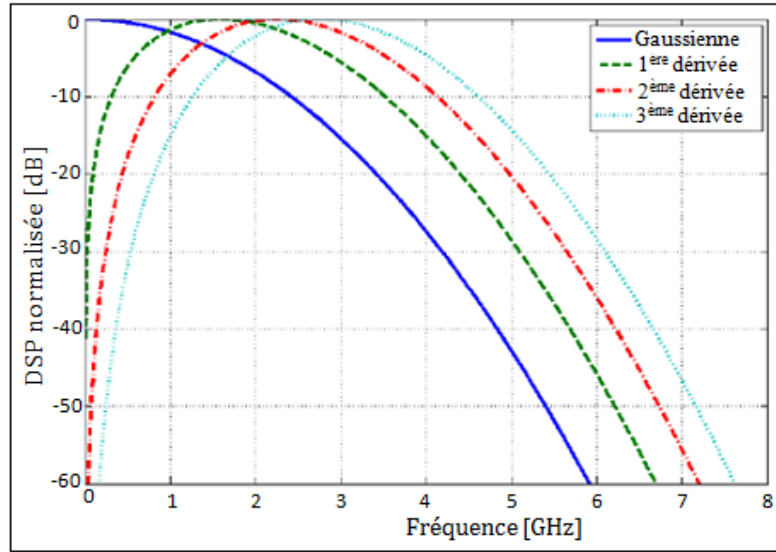


FIGURE 3.7 – Représentations fréquentielles de l'impulsion gaussienne et ses 3 premières dérivées.

autant l'occuper de façon optimale [58; 59]. En effet, l'analyse de l'équation (3.5) nous montre que l'ordre de la dérivée  $n$  est corrélé avec le paramètre  $t$  pour la détermination du maximum spectral. Si nous fixons l'ordre de la dérivée, une augmentation du paramètre  $\tau$  entraîne un déplacement de ce maximum spectral vers les basses fréquences tout en réduisant la largeur de bande de l'impulsion.

L'impulsion Gaussienne transposée en fréquence est apparue comme étant une bonne candidate, elle permet de paramétrer de façon indépendante la position de l'impulsion d'un point de vue spectral par  $f_0$  ainsi que sa largeur de bande par  $\tau$ . L'équation (3.6) présente une impulsion gaussienne élémentaire multipliée par une porteuse qui permet une transposition en fréquence du spectre de cette impulsion.

Comme l'illustre la figure 3.8, il est possible d'optimiser les paramètres de l'impulsion afin d'occuper de façon optimale un gabarit fréquentiel donné comme un de ceux de la FCC.

$$p(t) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_G}{\sqrt{\pi}\tau}} \times \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \times \cos(2\pi f_0 t) \quad (3.6)$$

La représentation fréquentielle de (3.6) est donnée par :

$$P(f) = \sqrt{\varepsilon_G \sqrt{\pi}\tau} \times \left[ \exp\left(-\frac{(2\pi\tau(f-f_0))^2}{2}\right) + \exp\left(-\frac{(2\pi\tau(f+f_0))^2}{2}\right) \right] \quad (3.7)$$

### 3.3.1 Structure du symbole IR-UWB

En utilisant la modulation de saut temporel (*Time Hopping*) TH-UWB, l'expression générale d'un signal symbole  $p_s(t)$  de durée  $T_s$  émis en IR est donnée par l'équation (3.8). La durée symbole  $T_s$  comporte  $N_f$  trames dont chacune est de durée  $T_f$ . Chaque trame

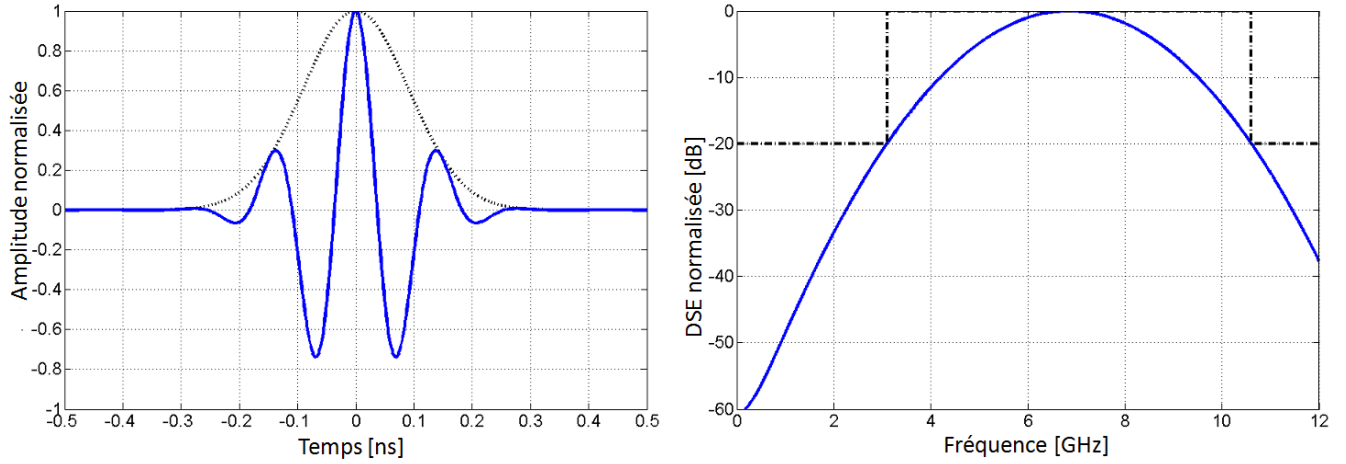


FIGURE 3.8 – Impulsion Gaussienne transposée en fréquence -  $f_0 = 6.85GHz$  et  $\tau = 91ps$ .

contient  $N_c$  chips, chacun est de durée  $T_c$  [50].

$$p_s(t) = \sum_{i=0}^{N_f-1} p(t - c_i T_c - iT_f) \quad (3.8)$$

où  $p(t)$  représente la forme d'onde de l'impulsion transmise, de durée  $T_p$  ( $T_p < T_c$ ). La séquence  $\{c_0, \dots, c_{N_f-1}\}$  représente le code pseudo-aléatoire du saut temporel associé à un utilisateur spécifique avec  $c_i \in [0, N_c - 1]$ .

La structure du signal TH-UWB est donnée dans la figure 3.9 pour mieux illustrer la modulation TH-UWB.

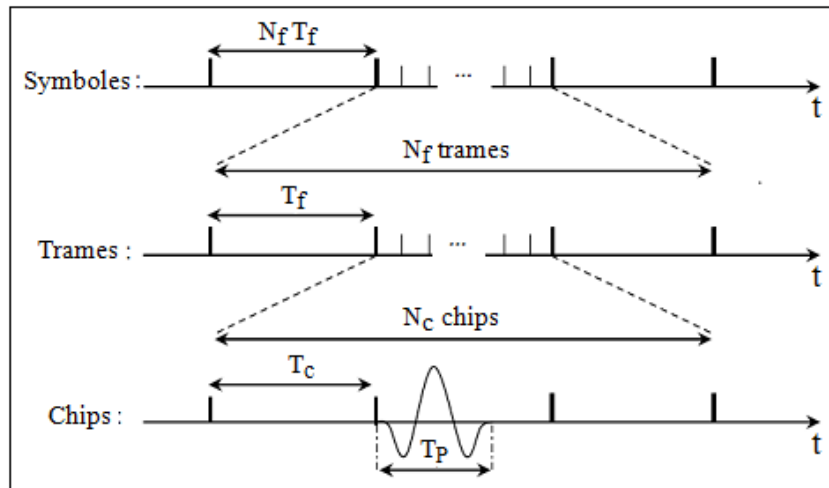


FIGURE 3.9 – Structure du signal TH-UWB.

### 3.3.2 Avantages d'IR-UWB

IR-UWB est une technologie de communication sans porteuse. Ce qui simplifie grandement sa réalisation, notamment par la possibilité d'une architecture entièrement numérique. L'information est codée et transmise sous forme d'impulsions de très courte

durée sur une très large bande. Selon la définition donnée par la FCC, la largeur de la bande doit être supérieure à 20% de la fréquence centrale ou supérieure à  $500\text{MHz}$ . Les caractéristiques de la technologie IR-UWB lui confèrent de nombreux avantages :

- ★ la simplicité de l'architecture d'IR-UWB, absence de conversion IF et de porteuse simplifie grandement sa réalisation.
- ★ La possibilité de l'accès multi-utilisateur : Grâce à la technique time-hopping permet l'accès multi-utilisateur.
- ★ La faible consommation d'énergie : La simplicité des circuits utilisés assure une faible consommation d'énergie et un faible encombrement.
- ★ La résistance aux multi-trajets : La prise en compte du delay-spread permet de réduire l'impact des multi-trajets. Remarquons que le delay-spread représente le temps nécessaire pour la stabilisation du canal.
- ★ La faible probabilité de collision : Le signal IR-UWB n'occupe le support que pendant une durée très courte : rapport cyclique faible (un chip dans chaque trame). La faible durée des impulsions réduit la probabilité de collision des impulsions émises.
- ★ La faible probabilité d'interception : L'utilisation de séquences de time-hopping permet de rendre le signal imperceptible pour une entité ne disposant pas d'information sur l'algorithme de génération des séquences.
- ★ Localisation et Tracking : la très faible durée des impulsions permet une localisation très précise.

### 3.3.3 Modulations associées à l'IR-UWB

Plusieurs types de modulations peuvent être utilisés pour coder l'information avant la transmission des impulsions. La modulation joue un rôle important car elle peut être déterminante dans la robustesse de la liaison ainsi que le débit de données ; ces deux éléments peuvent impacter sur la complexité et le choix des architectures d'émission et de réception.

#### 3.3.3.1 Modulation par amplitude de l'impulsion (PAM)

La modulation PAM consiste à attribuer une amplitude donnée à l'impulsion en fonction de la donnée à transmettre. D'un point de vue mathématique, le signal  $s(t)$  modulé en amplitude s'exprime :

$$s(t) = \sum_j \alpha_j p(t - jT_s) \quad (3.9)$$

$p(t)$  est l'impulsion élémentaire

$\alpha_j \in R$  est l'amplitude associée au symbole  $j$  à transmettre.

$T_s$  est la durée des symboles.

Cette modulation peut s'appliquer avec  $M$  états d'amplitude différents, ce qui permet d'augmenter l'efficacité spectrale. Mais pour une puissance moyenne d'émission fixée, augmenter le nombre d'états  $M$  dégrade la probabilité d'erreur si toutes les amplitudes sont de même signe. Cette modulation peut être utilisée avec tous les types de récepteur,

mais tous n'ont pas la même facilité à discriminer les différentes amplitudes. La figure 3.10 nous présente un exemple de modulation d'amplitude à quatre états (4-PAM), avec une représentation grossière d'impulsions à amplitude positive.

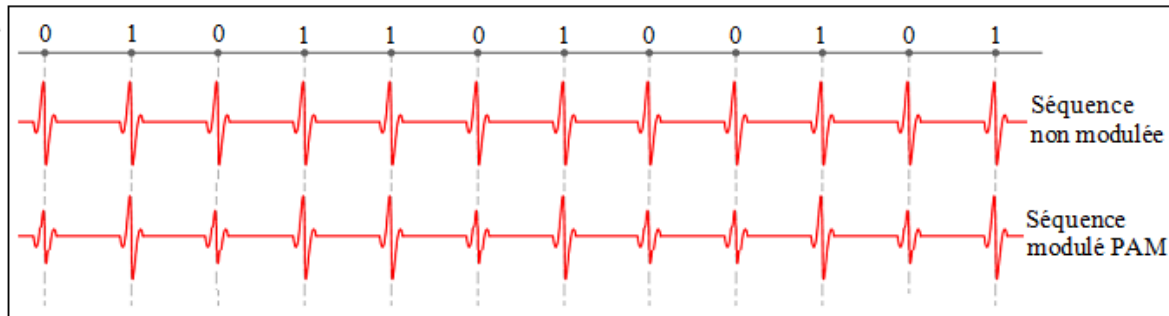


FIGURE 3.10 – Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en PAM.

### 3.3.3.2 Modulation On Off Keying (OOK)

La modulation *On Off Keying* (*tout ou rien*) est issue des systèmes optiques dans lesquels elle est très utilisée, et elle consiste à coder l'information par la présence ou l'absence d'impulsion. Il s'agit d'un cas particulier de la modulation PAM définie par l'expression 3.9, mais dont le coefficient d'amplitude prend deux valeurs telles que :

$$s(t) = \sum_j \alpha_j p(t - jT_s) \implies \alpha_j \in \{0, A\} \quad (3.10)$$

où  $T_s$  est la durée des symboles et  $p(t)$  est l'impulsion élémentaire.

La figure 3.11 illustre la modulation OOK, l'information 1 est transmise par l'émission de l'impulsion d'amplitude  $\alpha$  tandis que l'absence d'impulsion ( $\alpha = 0$ ) correspond à la transmission de l'information 0. La démodulation consiste alors à décider de la présence ou non d'impulsion durant la période d'observation. La modulation OOK présente un

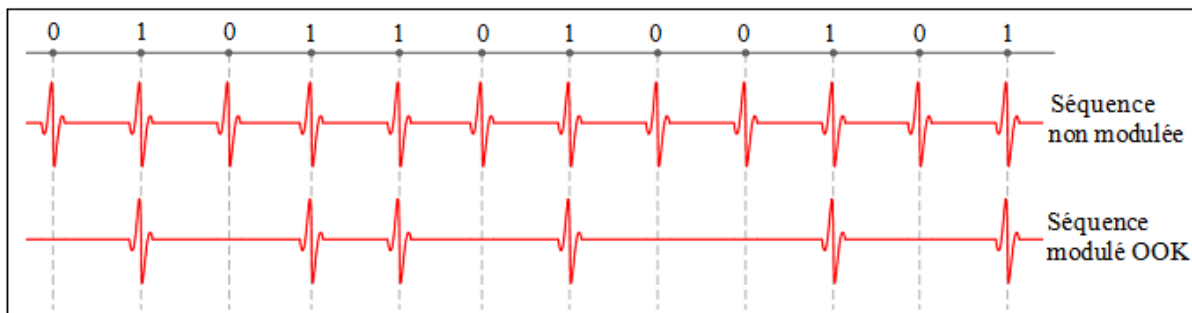


FIGURE 3.11 – Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en OOK.

certain nombre d'avantages [60], en l'occurrence :

- Sa mise en œuvre est facile aussi bien à l'émission qu'à la réception et elle facilite la synchronisation car la position et la phase de l'impulsion ne varient pas.
- Cette modulation est accessible aux récepteurs de faible complexité dont en particulier le détecteur d'énergie.

- Comparée à une modulation de type PPM par exemple, elle permet, à puissance moyenne et débit équivalents, d'émettre des impulsions dont la puissance peut être deux fois supérieure. Cela permet de faciliter la détection des impulsions à la réception dans le cas des récepteurs à détection d'énergie.

### 3.3.3.3 Modulation par position de l'impulsion (PPM)

Cette modulation consiste à transmettre l'information à l'aide de la position temporelle de l'impulsion. Elle s'appuie sur  $M$  états différents correspondant chacun à une position de l'impulsion dans le temps symbole ; on parle ainsi de MPPM pour indiquer ces  $M$  positions de l'impulsion. Dans [61], l'intervalle de modulation est inférieur à la durée de l'impulsion, on parle alors de PPM courte échelle ; lorsque cet intervalle est largement supérieur à la durée de l'impulsion, on parle de PPM large échelle.

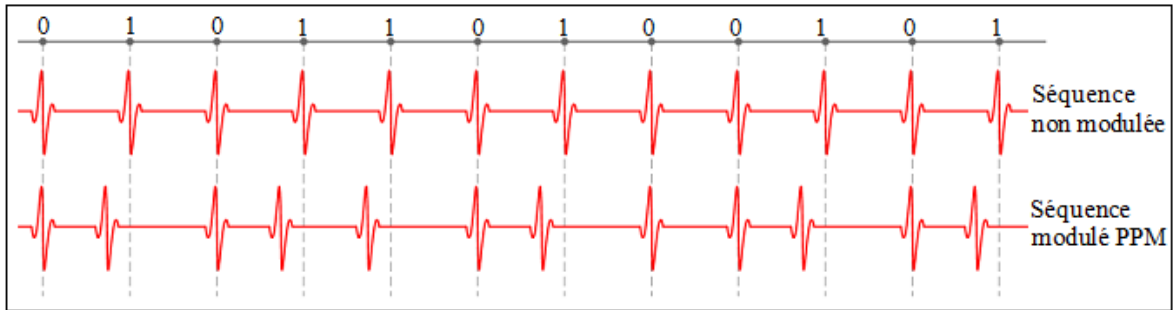


FIGURE 3.12 – Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en PPM.

Le signal  $s(t)$  modulé en PPM s'écrit :

$$s(t) = \sum_j p(t - d_k \Delta - jT_s) \quad (3.11)$$

$T_s$  est la durée du symbole.

$\Delta$  est l'intervalle de modulation (écart entre deux positions consécutives).

$k \in [0, M - 1]$  indique le décalage associé à l'information transmise dans le symbole  $j$ ,  $M$  étant le nombre d'états de la modulation.

Il s'agit d'une modulation orthogonale dont l'un des avantages est son aptitude à définir plusieurs états à l'aide de décalages variés. La PPM se distingue aussi par la simplicité de sa mise en œuvre à l'émission, qui dépend de la capacité à contrôler l'instant d'émission de l'impulsion. La PPM peut être utilisée avec la plupart des récepteurs dont la principale difficulté sera de discriminer chacun des états de position lors de la démodulation.

### 3.3.3.4 Modulation de phase (BPSK)

Cette modulation consiste à créer un système binaire en transmettant l'information par le biais de la polarité de l'impulsion. On peut ainsi considérer cette modulation comme une particularité de la PAM dont les amplitudes sont antipodales. La BPSK est illustrée en figure 3.13, et elle est représentée comme suit :

$$s(t) = \sum_j \alpha_j p(t - jT_s) \implies \alpha_j \in \{-A, A\} \quad (3.12)$$

Pour une puissance moyenne d'émission donnée et avec un récepteur optimal cohérent, la BPSK conduit à une meilleure probabilité d'erreur binaire que l'OOK et la BPPM. De plus, le signal est de moyenne nulle si les bits sont équiprobables, ce qui permet de supprimer les composantes discrètes (raies spectrales) lorsque le signal est aléatoire et stationnaire [62; 63].

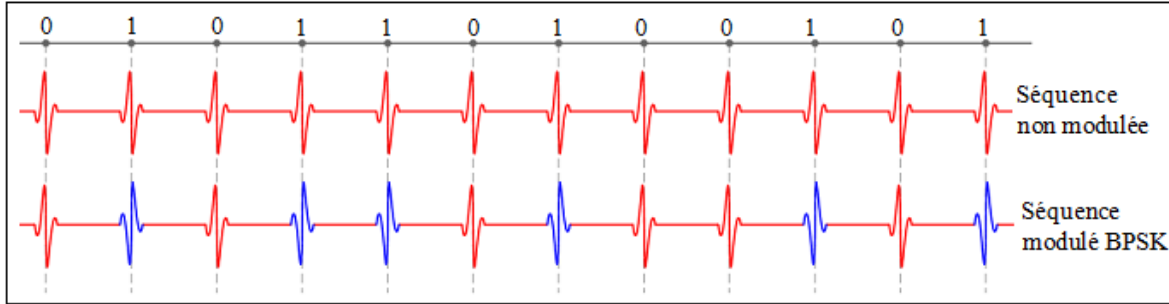


FIGURE 3.13 – Exemple d'une séquence d'impulsions modulée en BPSK.

### 3.3.4 Accès multiple en bande unique

Les deux techniques qui permettent d'assurer l'accès multiple dans les systèmes de communications UWB impulsionnel uni-bande sont : La technique de saut temporel TH (*Time-Hopping*) et celle de séquence directe DS (*Direct-Sequence*). La première consiste à randomiser la position de l'impulsion UWB transmise alors que la deuxième approche est basée sur la transmission continue d'impulsions qui composent un bit de donnée.

#### 3.3.4.1 Code de saut Temporel TH-UWB

Comme mentionné auparavant, l'accès multiple et la restriction de puissance des systèmes UWB ont motivé l'utilisation d'un schéma de transmission, où chaque symbole de donnée est codé par la transmission de plusieurs impulsions décalé dans temps. Dans ce schéma, la position de chaque impulsion est déterminé par un code pseudo-aléatoire appelé Time-Hopping code et donc, chaque symbole se voit attribué plus d'énergie et donc la portée de transmission augmente. De plus, les différents utilisateurs distingués par leur code TH peuvent être transmis en même temps. L'expression du signal transmis pour le  $j^{\text{ème}}$  utilisateur dépend du schéma de modulation utilisé. Par exemple, dans le cas de la modulation PAM on peut exprimer le signal du  $j^{\text{ème}}$  utilisateur par :

$$S^{(j)}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=0}^{N_s-1} w(t - kT_s - lT_f - C_l^{(j)}T_c)d_k^{(j)} \quad (3.13)$$

Où  $d_k^{(j)}$  est le  $k^{\text{ème}}$  bit de donnée du  $j^{\text{ème}}$  utilisateur, et  $w$  est l'impulsion utilisée pour la modulation impulsionnelle PAM,  $N_s$  est le nombre d'impulsions transmises pour chaque symbole d'informations. Le temps total du symbole est divisé en  $N_s$  trames de durée  $T_f$ , qui sont divisés à leurs tours en des chips de durée  $T_c$ . Chaque période de durée  $T_f$  contient une impulsion dont la position est déterminée par une séquence de code de saut temporel

$C_l^{(j)}$  propre à chaque utilisateur d'indice  $j$ . Pour le cas de la modulation PPM, le signal  $S^{(j)}(t)$  peut s'écrire sous la forme :

$$S^{(j)}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=0}^{N_s-1} w(t - kT_s - lT_f - C_l^{(j)}T_c - d_k^{(j)}\delta) \quad (3.14)$$

Où  $\delta$  est la distance entre la position d'impulsion qui correspond à '1' et celle du bit '0'. Lors de l'utilisation de la modulation PSM, l'expression du signal peut s'écrire sous la forme de :

$$S^{(j)}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=0}^{N_s-1} w^{d_k^{(j)}}(t - kT_s - lT_f - C_l^{(j)}T_c) \quad (3.15)$$

Dans ce cas, l'impulsion utilisée  $w^{d_k^{(j)}}$  dépend du  $k^{\text{ème}}$  bit de donnée du  $j^{\text{ème}}$  utilisateur  $d_k^{(j)}$ . Le signal à émettre est donc obtenu par superposition des signaux des différents utilisateurs qui résultent de la modulation PAM, PPM ou PSM. Cependant, dans ce cas l'OOK ne peut pas être utilisé puisqu'on ne pourrait pas savoir la position de l'impulsion qui correspond à un zéro modulé.

Dans l'UWB impulsionnel, la démodulation des signaux à la réception se fait par corrélation, en multipliant le signal reçu par un autre signal modèle. L'utilisation des codes de saut temporel orthogonaux permettent ainsi d'assurer un accès multiple dans le cas de plusieurs utilisateurs et donc, de pouvoir séparer à la réception les signaux des différents utilisateurs : Si plusieurs utilisateurs transmettent simultanément en utilisant des code TH orthogonaux, seul le signal de l'utilisateur concerné peut être démodulé en utilisant le code approprié. On peut dans ce cas donc parler d'un accès multiple par répartition de code (Code division multiple access CDMA).

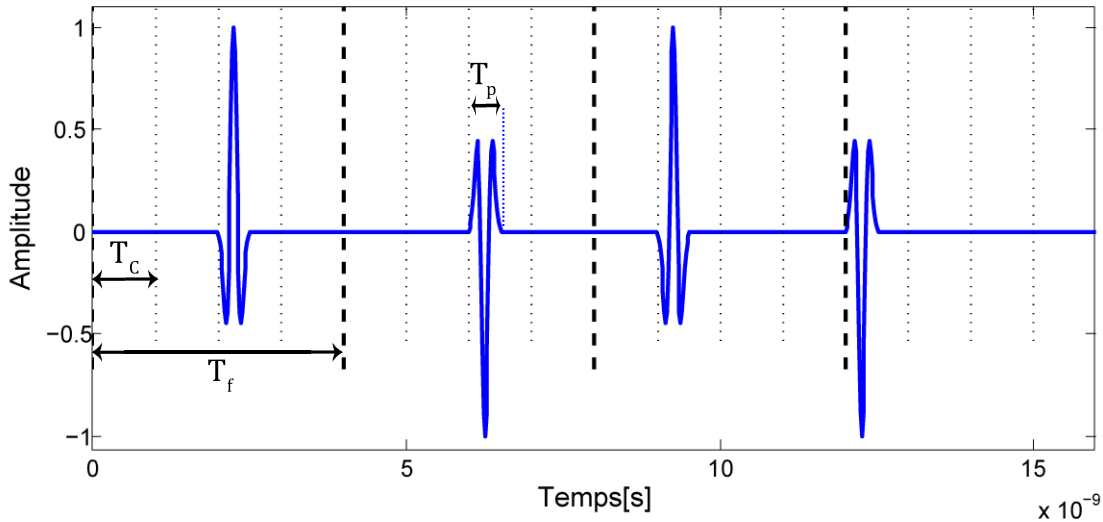


FIGURE 3.14 – Illustration du principe de la modulation PAM-TH.

### 3.3.4.2 Étalement du spectre DS-UWB

La modulation UWB à étalement de spectre, connue par DS-UWB (*Direct Sequence Ultra WideBand*), est la solution adoptée par l'UWB-Forum [64]. Elle profite de la largeur de bande allouée pour les systèmes UWB pour diviser le spectre en deux bandes

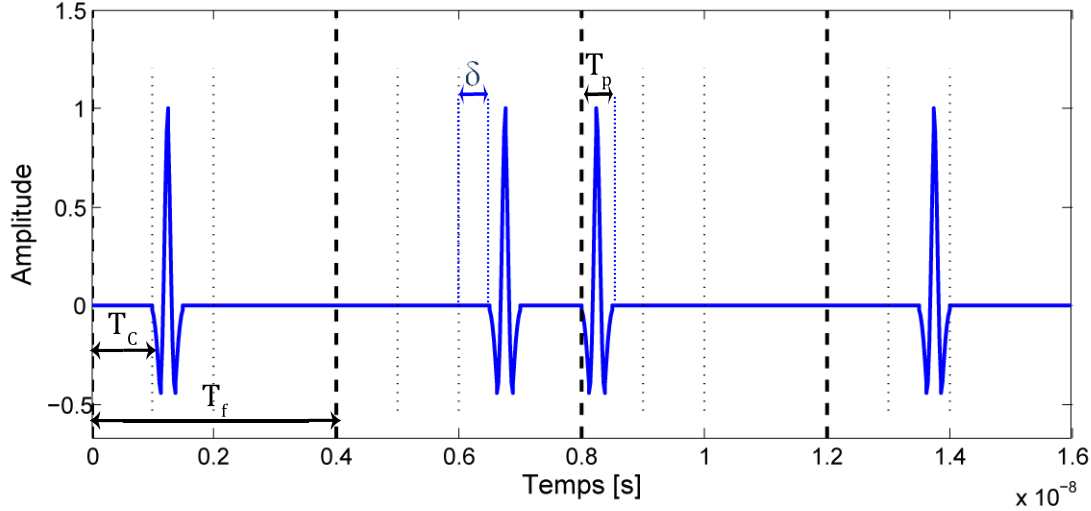


FIGURE 3.15 – Illustration du principe de la modulation PPM-TH.

duales, la première s'étale de  $3.1\text{GHz}$  à  $4.85\text{GHz}$  alors que la deuxième occupe la bande  $6.2 - 9.7\text{GHz}$ . Cette séparation en bandes duales permet de protéger les bandes de fréquences sensibles, plus précisément la bande UNII (*Unlicensed National Information Infrastructure*) utilisée par les standards IEEE 802.11 autour de la fréquence  $5\text{GHz}$ . Ainsi, les impulsions utilisées s'étalent sur une durée de  $0.3$  à  $0.5\text{ns}$  sur les deux bandes duales.

De même que pour les modulations impulsionnelles mentionné auparavant, chaque trame est divisée en plusieurs chips sauf que les différentes impulsions sont mises dans chaque chip de la trame. Ainsi, le signal résultant est formé continuellement de suite d'impulsions et donc le faible rapport cyclique qu'on retrouve chez l'UWB impulsionnel ne se présente plus. Selon le standard proposé par l'UWB-Forum, les symboles à transmettre sont représentés par des codes d'étalement (composés par des  $1$  et  $-1$ ), générés en utilisant la modulation en bande de base BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). La longueur du code d'étalement est définie suivant le débit souhaité, variant entre  $1$  à  $24$  chips et pouvant établir un débit allant de  $28\text{Mbits/s}$  jusqu'à  $1320\text{Mbits/s}$ . Les différents utilisateurs, regroupés en des "piconets", peuvent profiter de l'accès multiple en utilisant des codes orthogonaux. Ces systèmes DS-UWB sont plus faciles en implémentation et donc imposent moins de contraintes pour les composantes RF, mais aussi semblent plus robuste aux multi-trajets du canal.

Le schéma de transmission DS-UWB convient aux modulations PAM, PSM et OOK mais pas à la modulation par position PPM puisqu'elle est intrinsèquement liée au TH-UWB. L'expression du signal du  $j^{\text{ème}}$  utilisateur en utilisant la technique DS-UWB dans le cas d'utilisation de la modulation PAM ou OOK est donnée par :

$$S^{(j)}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=0}^{N_s-1} w(t - kT_s - lT_c c_l^{(j)}) d_k^{(j)} \quad (3.16)$$

$d_k^{(j)}$  est le  $k^{\text{ème}}$  bit de donnée du  $j^{\text{ème}}$  utilisateur,  $c_l^{(j)}$  le  $l^{\text{ème}}$  chip du code pseudo-aléatoire et  $w(t)$  l'impulsion utilisée de durée  $T_p$ . Pour le DS-UWB, la durée d'impulsion est égale à la durée du chip  $T_p = T_c$ , tandis que  $N_s$  présente le nombre d'impulsions par bit avec

$T_s = N_s T_c$ . Pour le cas de modulation PSM, le signal  $S^{(j)}(t)$  peut s'exprimer par :

$$S^{(j)}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=0}^{N_s-1} w^{d_k^{(j)}}(t - kT_s - lT_c c_l^{(j)}) \quad (3.17)$$

L'impulsion utilisée est choisie suivant la valeur du  $k^{\text{ème}}$  bit  $d_k^{(j)}$ . La figure 3.16 donne une comparaison entre le schéma de transmission à saut temporel TH-UWB et à étalement de spectre DS-UWB.

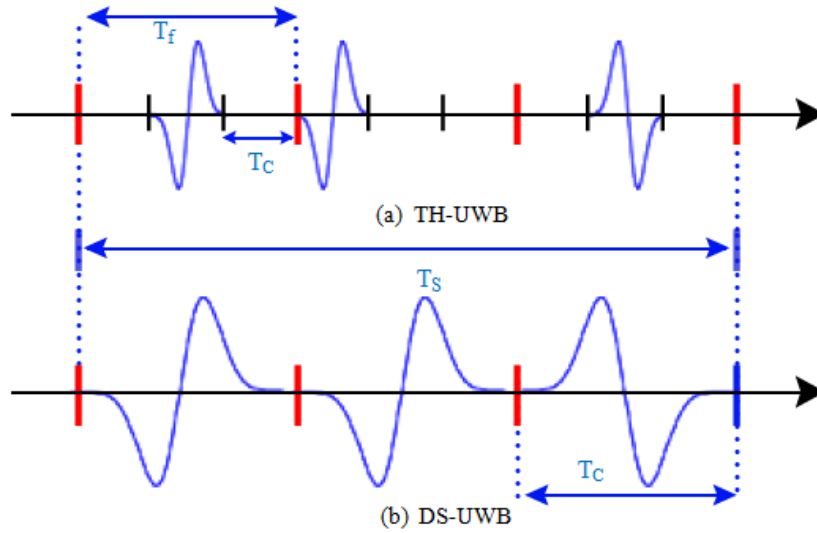


FIGURE 3.16 – Comparaison entre la représentation temporelle du (a) TH-UWB et du (b) DS-UWB.

### 3.3.5 Propagation

La caractérisation du canal de propagation UWB est importante pour le développement d'un bilan de liaison précis ou pour le bon fonctionnement du système UWB dans un environnement donné. Nous nous intéressons ici aux pertes de propagation d'un signal radio impulsionnelle UWB entre un émetteur et un récepteur. En effet, les pertes de propagation peuvent être expliquées par la puissance du signal reçu qui est inférieure à celle du signal émis qui est due aux pertes en fonction de la distance et les effets de masquage [65]. le signal peut subir deux types de pertes : pertes à petite échelle et pertes à grande échelle comme indiqué dans la figure 3.17. Les pertes à grande échelle définissent les fluctuations de la puissance moyenne mesurées sur un déplacement de plusieurs dizaines de longueurs d'onde [66]. Les fluctuations à petite échelle sont observées sur un déplacement suffisamment petit (de l'ordre de la longueur d'onde) qui sont dues au phénomène des multitrajets. A titre illustratif, par exemple pour le monocycle gaussien de la figure 3.6, la fréquence maximale ( $f_h$ ) à  $-10dB$  est de  $3.5GHz$ , ce qui donne une longueur d'onde  $\lambda = \frac{c}{f_h} = 8.6cm$ . Par conséquent, les fluctuations à petite échelle peuvent apparaître pour des variations de distance de  $\frac{\lambda}{2} = 4.3cm$ .

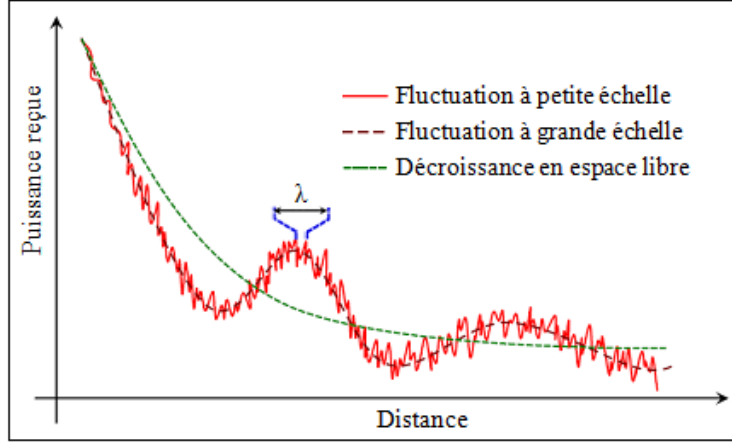


FIGURE 3.17 – Puissance reçue en fonction de la distance.

### 3.3.5.1 Propagation en espace libre

La propagation en espace libre est réalisée lorsque l'émetteur et le récepteur sont en LOS. Dans ce cas nous pouvons écrire [67] :

$$P_r = K \frac{P_t G_t G_r}{d^2} \quad (3.18)$$

$K$  est une constante,

$P_t$  et  $P_r$  sont respectivement les niveaux de puissance du signal émis et du signal reçu,

$d$  la distance séparant l'émetteur du récepteur,

$G_t$  et  $G_r$  sont respectivement les gains d'antennes de l'émetteur et du récepteur.

La perte de propagation signifie l'atténuation du signal. En décibel, Nous pouvons formuler cette perte comme suit :

$$PL[dB] = P_t[dBm] - P_r[dBm] \quad (3.19)$$

ce qui donne :

$$PL[dB] = 20 \log(d) - 10 \log(K G_t G_r) \quad (3.20)$$

Soit  $P_r(d_0)$  la puissance reçue mesurée à une distance de référence  $d_0$ , alors nous obtenons à partir de l'équation (3.18) ce qui suit :

$$P_r(d) = P_r(d_0) \frac{d_0^2}{d^2} \quad (3.21)$$

En décibel, nous pouvons écrire :

$$P_r(d)[dBm] = P_r(d_0)[dBm] - 20 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3.22)$$

### 3.3.5.2 Propagation par multitrajets

Le modèle de propagation par multitrajets est obtenu par la généralisation de l'équation (3.22), où nous observons clairement que la puissance reçue est inversement proportionnelle à  $d^n$ . Par ailleurs, les modèles décrits ci-dessus prennent uniquement en compte

la distance entre l'émetteur et le récepteur. Toutefois, les pertes de propagation à une distance donnée ne sont pas constantes à cause des obstructions environnementales comme nous venons de le voir dans la figure 3.17. Par conséquent, nous pouvons avoir des atténuations différentes du signal à une même distance mais à des positions différentes dans un milieu donné. Alors, nous pouvons écrire ce qui suit [67] :

$$\overline{Pr}(d)[dBm] = \overline{Pr}(d_0)[dBm] - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3.23)$$

où  $\overline{Pr}(d)$  et  $\overline{Pr}(d_0)$  représentent les puissances moyennes reçues respectivement aux distances  $d$  et  $d_0$ . Cette dernière équation est obtenue avec la supposition que les pertes de propagation sont indépendantes de la fréquence [68]. Finalement, le modèle de perte de propagation est modélisé comme suit [67; 66] :

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3.24)$$

où  $\overline{PL}(d_0)$  est la perte moyenne de propagation à une distance  $d_0$  et  $X_\sigma$  (en dB), est une variable aléatoire log-normale de moyenne zéro et d'écart-type  $\sigma$ .

### 3.3.6 Modélisation du canal de propagation

#### 3.3.6.1 Modèle de Saleh-Valenzuela

L'étude des systèmes de communication basés sur la technologie radio impulsionnelle UWB nécessite une parfaite connaissance du canal de propagation. Par conséquent, il est important d'avoir un modèle réaliste du canal de propagation pour les simulations. Par ailleurs, le modèle de canal le plus utilisé dans les systèmes UWB est celui basé sur le formalisme de Saleh et Valenzuela [65]. Dans ce modèle, la réponse impulsionnelle (RI) est représentée sous la forme d'une somme discrète de contributions individuelles. Chaque contribution, appelée rayon (rays), correspond à un trajet de propagation et possède un retard et une amplitude complexe distincts, et les rayons arrivent par groupes (clusters). Si nous désignons par  $T_l$  l'instant d'arrivée du  $l^{\text{ème}}$  groupe et  $\tau_{l,k}$  l'instant d'arrivée du  $k^{\text{ème}}$  rayon du  $l^{\text{ème}}$  groupe comme indiqué dans la figure 3.18, alors la RI discrète du canal s'écrit par [65] :

$$h(t) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} \beta_{l,k} e^{j\theta_{l,k}} \delta(t - T_l - \tau_{l,k}) \quad (3.25)$$

où  $L$  désigne le nombre de groupes et  $K_l$  le nombre de rayons dans le groupe. Les paramètres  $\beta_{l,k}$ ,  $\theta_{l,k}$  et  $\tau_{l,k}$  représentent respectivement l'amplitude, la phase et l'instant d'arrivée associés au  $k^{\text{ème}}$  rayon à l'intérieur du  $l^{\text{ème}}$  groupe. Par ailleurs, les coefficients de décroissance exponentielle inter et intra-groupes qui sont notés respectivement  $\Gamma$  et  $\gamma$ , sont liés à l'amplitude moyenne des différents rayons par l'expression suivante :

$$\overline{\beta_{l,k}^2} = \overline{\beta_{1,1}^2} e^{-\frac{T_l - T_1}{\Gamma}} e^{-\frac{\tau_{l,k}}{\gamma}} \quad (3.26)$$

où  $\overline{\beta_{1,1}^2}$  représente l'amplitude moyenne du premier groupe du premier rayon. L'écart  $T_l - T_{l-1}$  est modélisé par un processus de Poisson avec un taux d'arrivée  $\Lambda$  et l'écart  $\tau_{l,k} - \tau_{l,k-1}$

d'un même groupe est modélisé par un processus de Poisson avec un taux d'arrivée  $\lambda$  [69]. Ce qui donne les densités de probabilité PDF (*Probability Density Function*) des retards comme suit [65] :

$$P(T_i|T_{i-1}) = \Lambda e^{-\Lambda(T_i - T_{i-1})} \quad (3.27)$$

$$P(\tau_{l,k}|\tau_{l,k-1}) = \lambda e^{-\lambda(\tau_{l,k} - \tau_{l,k-1})} \quad (3.28)$$

Le modèle de Saleh-Valenzuela a été choisi comme un des modèles de référence par le groupe de la norme IEEE 802.15 [69]. Deux modèles statistiques ont ainsi été définis, l'un pour les applications courte portée (inférieur à 10 mètres), haut débit en intérieur (modèle IEEE 802.15.3a), et l'autre pour les applications à plus longue portée (allant jusqu'à 300 mètres) en intérieur et extérieur (modèle IEEE 802.15.4a) mais à bas débit. Ces modèles sont brièvement présentés dans les sections suivantes.

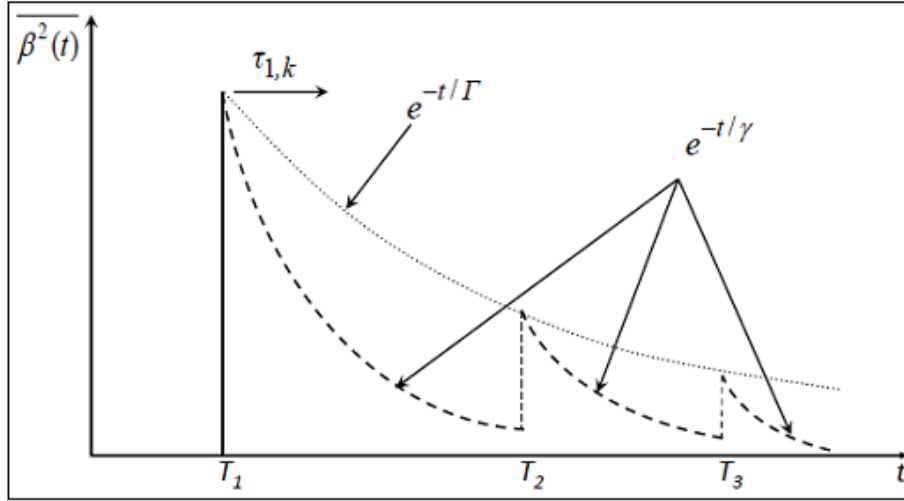


FIGURE 3.18 – Puissance reçue en fonction du temps.

### 3.3.6.2 Modèle de Ghassemzadeh

Ghassemzadeh et al. [70] ont développé un modèle statistique de perte de trajet pour la propagation UWB dans les environnements résidentiels, à la fois pour l'environnement ligne de vue et non ligne de vue (LOS et NLOS). Il est basé sur 300000 mesures de réponses en fréquence à l'échelle de 1.25GHz impulsions, avec une fréquence centrale de 5GHz, prises dans 23 maisons.

La perte de trajet (Path Loss) moyenne est définie par la puissance d'émission multipliée par les gains d'antenne à l'émission et à la réception, divisée par la puissance reçue :

$$Pl = \frac{P_t G_t G_r}{P_r} \quad (3.29)$$

Les auteurs modélisent l'affaiblissement de trajet en dB à une distance  $d$  de la façon suivante :

$$PL(d) = \left[ PL_0 + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \right] + S(d), d \geq d_0 \quad (3.30)$$

Où la distance  $d_0$  de référence est égal à  $1m$ ,  $PL_0$  est la perte de trajet à la distance de référence,  $\gamma$  est l'exposant de perte de trajet et  $S$  est l'affaiblissement de l'ombre. Ce dernier se révèle être logarithme normale (avec un écart-type  $\sigma$ ) dans leurs mesures, ce qui confirme les résultats d'autres chercheurs [71; 72].

Leur modèle de perte de trajet considère  $\gamma$  et  $\sigma$  comme des variables aléatoires.  $PL_0$ , la perte de trajet à la distance de référence, est un paramètre dont les valeurs sont données pour les environnements LOS et NLOS dans le tableau 3.1. L'exposant de perte de trajet a été trouvé suivant une distribution normale  $N[\mu_\gamma, \sigma_\gamma]$  :

$$\gamma = \mu_\gamma + n_1\sigma_\gamma \quad (3.31)$$

Où  $n_1$  suit une distribution normale ( $N[0, 1]$ ).

Le modèle d'atténuation progressive de l'ombre suit une approche similaire. Il suit une distribution logarithme normale, et donc en  $dB$  il suit une distribution normale d'écart type  $\sigma$ . Selon le modèle Ghassemzadeh, ce paramètre a une distribution normale de paramètres  $N[\mu_\sigma, \sigma_\sigma]$ . Cela peut être réécrit en fonction des variables aléatoires normales standards  $n_2$  et  $n_3$  :

$$S = n_2\sigma \quad (3.32)$$

$$\sigma = \mu_\sigma + n_3\sigma_\sigma \quad (3.33)$$

Ceci conduit à l'expression suivante pour la perte de trajet en  $dB$  :

$$\overline{PL(d)} = [PL_0 + 10\mu_\gamma \log_{10} d] + [10n_1\sigma_\gamma \log_{10} d + n_2\mu_\sigma + n_2n_3\sigma_\sigma] \quad (3.34)$$

Pour éviter  $\gamma$  et  $\sigma$  de prendre des valeurs irréalistes, les auteurs recommandent l'utilisation de variables aléatoires gaussiennes tronquées pour  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$ . Ils indiquent les bornes suivantes :  $n_1 \in [-1.25, 1.25]$ ;  $n_2, n_3 \in [-2, 2]$

TABLE 3.1 – Paramètres des modèles de canaux Ghassemzadeh pour les environnements résidentiels LOS et NLOS.

Paramètres	description	LOS	NLOS
$PL_0$	affaiblissement sur le trajet à $d_0$	47dB	51dB
$\mu_\gamma$	moyenne de l'exposant d'affaiblissement sur le trajet	1.7	3.5
$\sigma_\gamma$	écart type de l'exposant d'affaiblissement sur le trajet	0.3	0.97
$\mu_\sigma$	moyenne de l'écart type de l'occultation	1.6	2.7
$\sigma_\sigma$	écart type de l'écart type de l'occultation	0.5	0.98

### 3.3.6.3 Modèle IEEE 802.15.3a

Dans ce modèle, les paramètres sont fournis pour caractériser les taux d'arrivée des groupes  $\Lambda$  et des rayons  $\lambda$ , ainsi que les coefficients de décroissance exponentielle inter et intra-groupes ( $\Gamma$  et  $\gamma$ ). Dans ce cas, nous distinguons quatre types de canaux CM1, CM2, CM3 et CM4 définis comme suit [73] :

- le modèle de canal CM1 correspond à une distance de 0 à 4 m en situation LOS ;

- le modèle de canal CM2 correspond à une distance de 0 à 4 m en situation NLOS ;
- le modèle de canal CM3 correspond à une distance de 4 à 10 m en situation NLOS ;
- le modèle de canal CM4 correspond à une situation NLOS sévère avec un nombre et une densité des trajets très importants.

La phase  $\theta_{l,k}$  prend uniquement les valeurs 0 et  $\pi$  [73] dans ce modèle. Les paramètres des différents modèles de canaux sont donnés dans le tableau 3.2 [69].

TABLE 3.2 – Paramètres des canaux de la norme IEEE 802.15.3a.

Paramètres	CM1	CM2	CM3	CM4
$\Lambda(ns^{-1})$	0.02333	0.4	0.0667	0.0667
$\lambda(ns^{-1})$	2.5	0.5	2.1	2.1
$\Gamma(ns)$	7.1	5.5	14	24
$\gamma(ns^{-1})$	4.3	6.7	7.9	12

La figure 3.19 montre le tracé de 100 réalisations de la RI pour chaque modèle du canal IEEE 802.15.3a. Cette figure montre clairement que les RI peuvent être caractérisées par la dispersion des retards  $\tau_{rms}$ . Ce dernier représente l'écart-type du profil puissance-retard donné par [73] :

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_i (\tau_i - \tau_m)^2 |\alpha_i|^2}{\sum_i |\alpha_i|^2}} \quad (3.35)$$

Où  $\alpha$  représentent les coefficients discrets aux instants  $\tau_i$  de la RI et  $\tau_m$  est l'étalement moyen des retards défini par [73] :

$$\tau_m = \frac{\sum_i \tau_i |\alpha_i|^2}{\sum_i |\alpha_i|^2} \quad (3.36)$$

### 3.3.6.4 Modèle IEEE 802.15.4a

Dans ce modèle deux bandes de fréquences sont considérées : 2 à 10GHz et 0.1 à 1GHz [74]. Nous nous intéressons au modèle de la première bande de fréquences. La RI du modèle IEEE 802.15.4a reprend celle donnée dans l'équation (3.25), où la phase  $\theta_{l,k}$  est distribuée uniformément dans  $[0, \pi]$  [74]. Ce modèle définit deux taux d'arrivée des rayons  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  et un paramètre de mixité ( $\beta_{mix}$ ). En plus, le coefficient de décroissance exponentielle de chaque groupe augmente avec le retard [74]. Par ailleurs, nous distinguons plusieurs modèles statistiques de canaux UWB pour différents environnements de propagation.

Le tableau 3.3 résume quelques paramètres des canaux UWB dans les environnements de type résidentiel (CM1 et CM2) et de type bureau (CM3 et CM4) [75]. Par ailleurs, la figure 3.20 illustre 100 réalisations des modèles de canaux CM1 et CM2 de la norme IEEE 802.15.4a.

### 3.3.7 Systèmes d'émission IR-UWB

Les critères de définition d'un signal UWB permettent d'envisager les mécanismes les plus variés pour que le signal émis ait une largeur de bande supérieure à la valeur requise

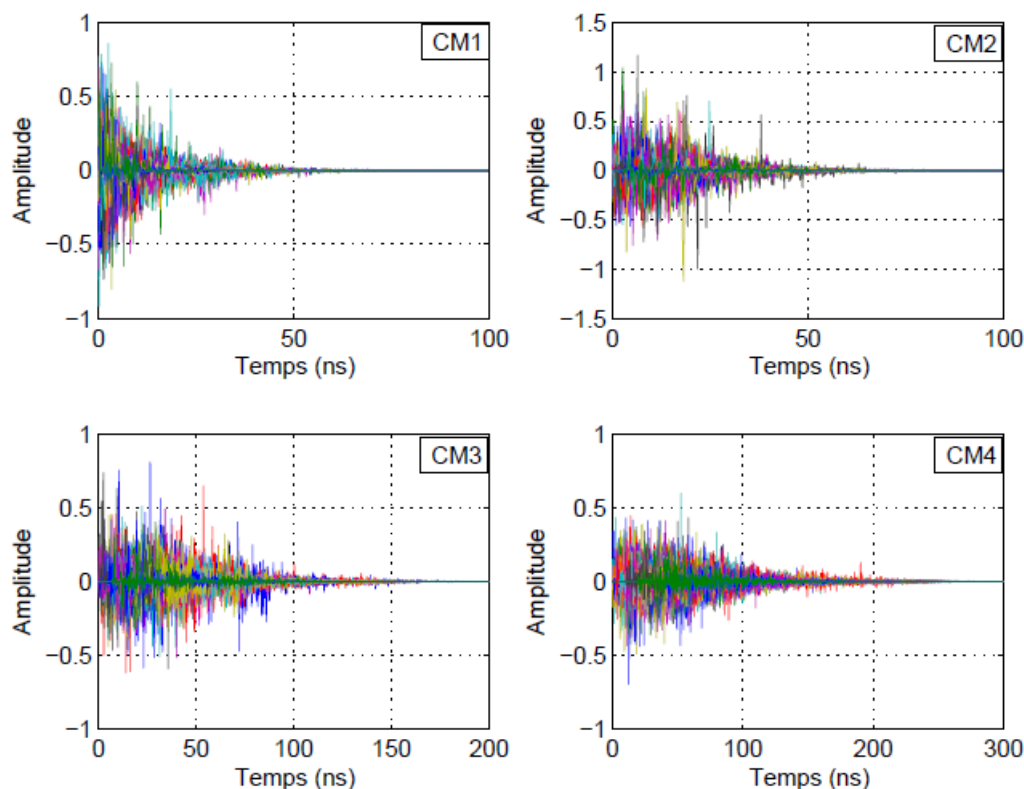


FIGURE 3.19 – Réalisations de la RI des canaux du modèle IEEE 802.15.3a..

TABLE 3.3 – Quelques paramètres des canaux de la norme IEEE 802.15.4a.

Paramètres	CM1(LOS)	CM2(NLOS)	CM3(LOS)	CM4(NLOS)
$\Lambda(ns^{-1})$	0.047	0.12	0.016	/
$\lambda_1(ns^{-1})$	1.54	1.77	0.19	/
$\lambda_2(ns^{-1})$	0.15	0.15	2.97	/
$\beta_{mix}$	0.0095	0.0045	0.0184	/
$\Gamma(ns)$	22.61	26.27	14.6	/

de  $500MHz$ . En générale, une impulsion est définie par :

- Sa fréquence centrale
- Sa bande passante à  $-3dB$  ou  $-10dB$
- Sa durée
- Son amplitude crête-à-crête
- Sa puissance
- Sa forme d'onde

Parmi les actions accomplies par l'émetteur UWB on distingue :

- Générer des impulsions courtes,
- Moduler les impulsions suivant le schéma de modulation choisi,
- Préparer le signal pour l'émission par l'antenne (transposition, amplification, filtrage...)

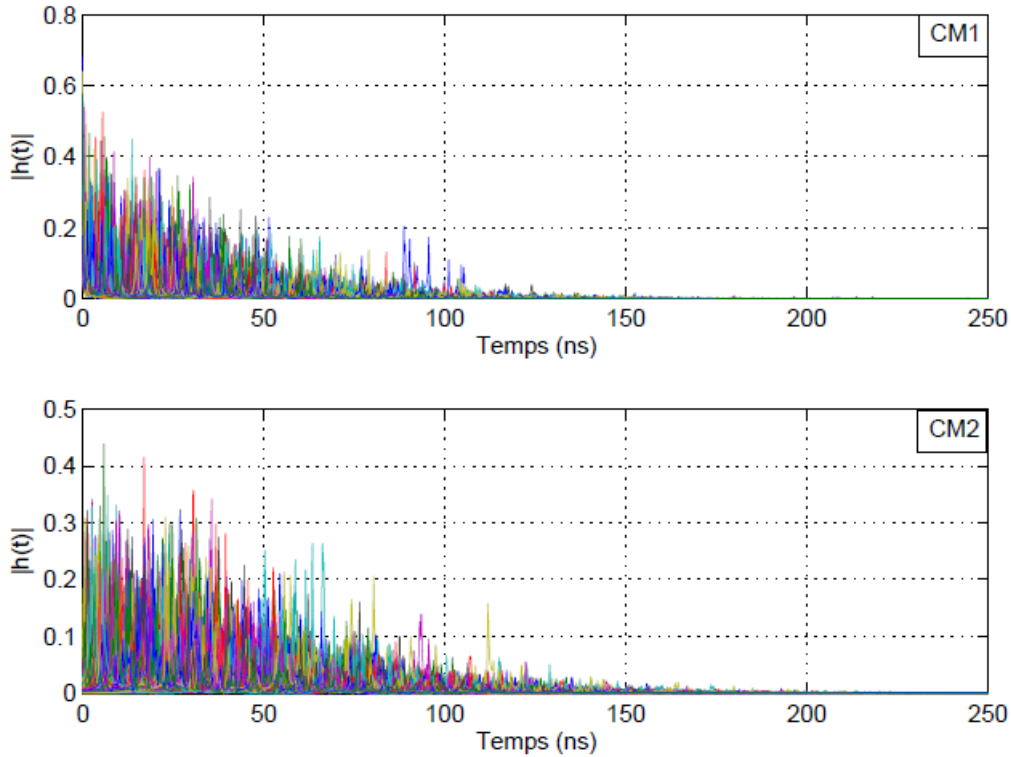


FIGURE 3.20 – RI des modèles de canaux CM1 et CM2 de la norme IEEE 802.15.4a.

La figure 3.21, présente un émetteur UWB où l'on retrouve les données interprétées par le bloc modulateur qui effectue la génération et la mise en forme des impulsions dans le symbole à transmettre. Le signal résultant est amplifié puis filtré avant d'être rayonné par l'antenne.

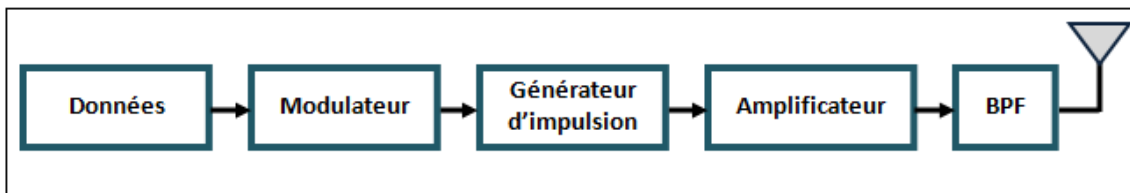


FIGURE 3.21 – Principe d'un émetteur UWB.

### 3.3.8 Réception des signaux IR-UWB

Le signal reçu correspond au signal émis ayant subi les transformations du canal, ce qui se caractérise par la combinaison du bruit avec la convolution entre le signal transmis et la réponse impulsionnelle du canal. Le signal reçu pour un utilisateur  $k$  est donné comme suit :

$$r(t) = s(t) * h(t) + n(t) \quad (3.37)$$

L'opérateur  $*$  désigne le produit de convolution,  $s(t)$  est le signal émis,  $h(t)$  désigne la réponse impulsionnelle du canal et  $n(t)$  représente un bruit blanc gaussien.

La réception du signal consiste à retrouver l'information contenue dans le signal reçu  $r(t)$ . Deux phases caractérisent ce processus de réception du signal :

- La synchronisation : elle consiste à caler le récepteur sur les instants d'arrivée des impulsions dans la mesure où celles-ci ont subi l'influence du canal, notamment la dispersion de l'énergie de chaque impulsion à travers les trajets multiples.
- La démodulation : son principe est de retrouver quelle information a été transmise à travers les impulsions reçues.

Dans cette section, nous présentons trois grandes familles de récepteurs IR-UWB : les récepteurs cohérents, les récepteurs différentiels et les récepteurs non-cohérents à détection d'énergie.

### 3.3.8.1 Récepteur cohérent

Le récepteur cohérent optimal pour un signal IR-UWB est un récepteur à corrélation. Sa structure est donnée par la figure 3.22. Le signal reçu est multiplié par un motif de corrélation généré localement. Ce motif est créé suivant les informations provenant des algorithmes de synchronisation et d'estimation du canal. Le résultat est passé à un intégrateur de durée d'intégration  $T_i$  et un bloc de décision.

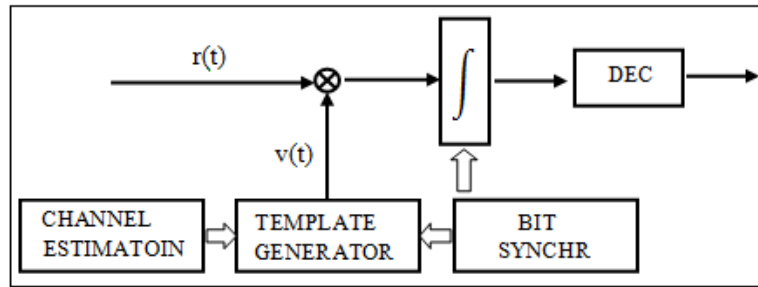


FIGURE 3.22 – Structure d'un récepteur IR-UWB cohérent.

Le récepteur optimal est un "rake" qui consiste à multiplier le signal reçu par le motif adapté. Dans le cas d'un canal réel multi-trajets, le signal reçu subit des distorsions et l'estimation du canal doit estimer cette distorsion. Cette opération est très complexe. Dans la pratique, l'algorithme d'estimation du canal se contente de fournir au motif des informations sur les amplitudes et les délais des  $L$  trajets les plus forts. Avec une technique de combinaison de type MRC (Maximum Ratio Combining), le motif de corrélation  $v(t)$  est donné la formule suivante :

$$v(t) = \sum_{l \in B_L} \alpha_l p(t - \tau_l) \quad (3.38)$$

où  $B_L = \{l_0, l_1, \dots, l_{L-1}\}$  sont les indices ordonnés des  $L$  trajets les plus forts,  $\alpha_l$  et  $\tau_l$  sont respectivement l'amplitude et le délai du trajet numéro  $l$  introduits par le canal. Sans perte de généralité, dans le cas d'une modulation BPSK, l'organe de décision démodule suivant le signe de la sortie de l'intégrateur. La décision est décrite par l'équation suivante :

$$\hat{\alpha}_n = \text{sgn} \left[ \int_{nT_s}^{nT_s + T_i} r(t)v(t - nT_s) dt \right] \quad (3.39)$$

La durée d'intégration doit satisfaire la condition  $T_i \geq \tau L - 1$ .

Le récepteur cohérent nécessite l'opération de l'estimation du canal et une synchronisation précise ce qui entraîne plus de complexité des traitements du récepteur. Donc les récepteurs cohérents nécessitent une complexité et une consommation importantes. Par contre, ils sont les plus performants car ils sont très proches du récepteur optimal.

### 3.3.8.2 Récepteurs différentiels

La structure de ce type de récepteurs est illustrée par la figure 3.23.

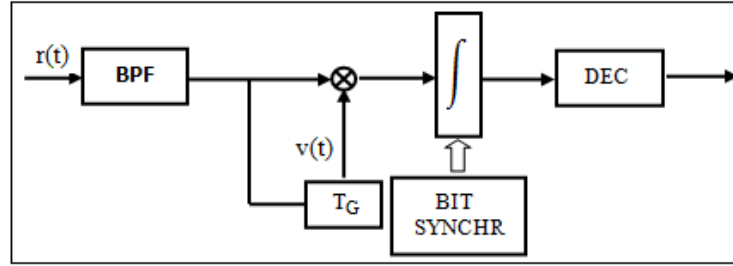


FIGURE 3.23 – Structure d'un récepteur IR-UWB différentiel.

Le principe du récepteur différentiel est de créer le motif à partir d'une réplique du signal reçu décalé de la durée symbole  $T_s$ . Ainsi, l'expression du motif est donnée par l'équation (3.40) :

$$v(t) = r(t - T_s) \quad (3.40)$$

L'opération de corrélation fait apparaître la variation d'amplitude entre deux impulsions consécutives porteuse de l'information transmise. Un filtre passe-bande de réponse impulsionnelle  $z(t)$  et de bande  $B_w$  est utilisé pour limiter l'effet du bruit. La bande du filtre doit être conçue pour un compromis entre la réduction du signal utile et le bruit. Pour une modulation BPSK différentielle, la décision se fait comme dans le cas du récepteur cohérent selon le signe de la sortie de l'intégrateur [78] :

$$\hat{\alpha}_n = \text{sgn} \left[ \int_{nT_s}^{nT_s+T_i} \hat{r}(t) \hat{r}(t - [n-1]T_s) dt \right] \quad (3.41)$$

Où  $\hat{r}(t) = r(t) \otimes z(t)$

Le récepteur différentiel peut s'en passer de l'opération de l'estimation du canal en générant le motif à partir du signal reçu. La complexité de cette structure de réception provient de la difficulté à implémenter la ligne à retard. La complexité globale est simplifiée par rapport au récepteur cohérent en contre-partie d'une perte des performances [78].

### 3.3.8.3 Récepteurs non-cohérents à détection d'énergie

Le récepteur non cohérent à détection d'énergie intègre l'énergie du signal reçu qui est contenue dans les trajets multiples collectés pendant une durée d'observation donnée. Ce récepteur est constitué d'un filtre passe-bande qui sélectionne la bande de fréquence désirée, un élément de mise au carré qui calcule la puissance instantanée du signal et

d'un intégrateur qui va calculer l'énergie du signal reçu pendant une ou plusieurs durées d'observation  $T$ . Le signal en sortie de l'intégrateur s'écrit :

$$\widehat{\alpha}_n = 1 \Leftrightarrow \left[ \int_{nT_s}^{nT_s+T_i} r(t)^2 dt \right] \geq \text{Seuil} \quad (3.42)$$

La démodulation au niveau de la réception dépend de la modulation utilisée. Du fait de l'élevation au carré du signal, le détecteur d'énergie n'est pas en mesure de discerner la phase du signal reçu, ce qui le rend inapproprié pour toute modulation faisant intervenir la phase du signal telle que la BPSK. Pour l'OOK, l'énergie [79] en sortie de l'intégrateur est comparée à un seuil qui peut être fixe ou adaptatif à l'état du canal tel que proposé dans [77] et revisité dans [80]. Ce seuil doit être défini de façon appropriée en fonction aussi bien du bruit collecté durant la fenêtre d'intégration que de la puissance de signal reçu.

Dans le cas de la PPM, on peut éviter la complexité associée à la définition d'un seuil approprié car l'énergie du signal reçu est évaluée aux instants possibles de la modulation. L'impulsion est considérée présente à l'instant qui fournit la valeur la plus grande de l'énergie en sortie de l'intégrateur.

La corrélation est remplacée par un calcul d'énergie dans ce type de récepteurs, il y a donc une relâche sur la contrainte du motif de corrélation local qui disparaît, et donc sur la synchronisation. Cela allège considérablement la consommation et la complexité du récepteur [81][82] mais entraîne des performances moins bonnes [83][84].

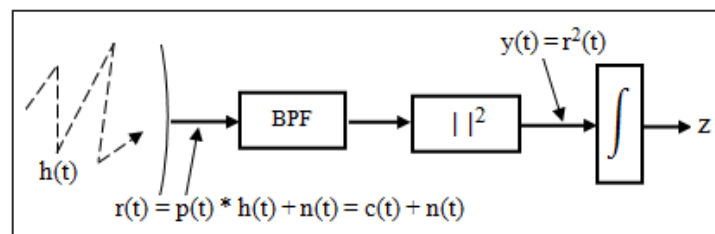


FIGURE 3.24 – Structure d'un récepteur IR-UWB non-cohérent à détection d'énergie.

### 3.4 Le standard IEEE 802.15.4a

Le groupe de travail IEEE 802.15.TG4 a mené des travaux sur les solutions bas débit à très faible complexité pour des applications de type WPAN (*Wireless Personal Area Network*). Ces travaux ont abouti à la publication du standard IEEE 802.15.4 [85; 86]. Dans la continuité, le groupe de travail a proposé en 2007 un amendement à la couche physique de ce standard par le développement d'une couche physique alternative basée sur l'IR-UWB. Cet amendement a donné lieu à la publication d'un nouveau standard IEEE 802.15.4a [88]. Ce nouveau standard a conservé les notions de base de la radio impulsionnelle décrites dans les sections précédentes mais avec des modifications dans le format du symbole. En outre, le standard ne spécifie pas un récepteur particulier mais conçoit un schéma d'émission compatible avec les structures de réception cohérente et non-cohérente.

Le paquet du standard IEEE 802.15.4a est composé de deux parties : un préambule suivi par les données. Le préambule est utilisé pour l'estimation du canal, la synchronisation, la détection du paquet... Les symboles du préambule sont transmis au moyen d'un code ternaire  $\in \{-1, 0, 1\}$  de longueur 31 ou 127 selon la valeur de la PRP. Ce Standard, est le même que la couche physique IR-UWB classique avec le regroupement des impulsions isolées d'un symbole TH-UWB en un seul burst de durée  $T_{burst}$  composé de  $N_{cpb}$  impulsions.

### 3.4.1 Description de la couche PHY-UWB

#### 3.4.1.1 Spécifications de l'allocation fréquentielle

Ces spécifications présentée dans le standard IEEE 802.15.4a concernant la couche PHY-UWB, font partie des caractéristiques du PMD (*Physical Medium Dependence*) du standard. La figure 3.25 présente la manière avec laquelle les seize canaux ont été alloués aux trois gammes de fréquence disjointes disponibles pour cette couche PHY-UWB. Un dispositif conforme au standard doit pouvoir fonctionner dans l'une des trois gammes de fréquence et doit obligatoirement adresser le canal obligatoire de la ou des gammes choisies. Ces trois gammes sont résumées ci-après :

- la gamme « Sub-GHz » pour un canal unique entre  $250MHz$  et  $749MHz$ ,
- la gamme « Low-Band » pour l'ensemble des 4 canaux entre  $3245MHz$  et  $4742MHz$ ,
- la gamme « High-Band » pour l'ensemble des 11 canaux entre  $5949MHz$  et  $10234MHz$ .

La bande de fréquence allant de  $4.8GHz$  à  $5.9GHz$  est laissée libre de tout signal UWB se référant à ce standard afin de ne pas perturber les systèmes de type WLAN déjà présents dans cette partie du spectre même si la FCC met cette dernière à disposition.

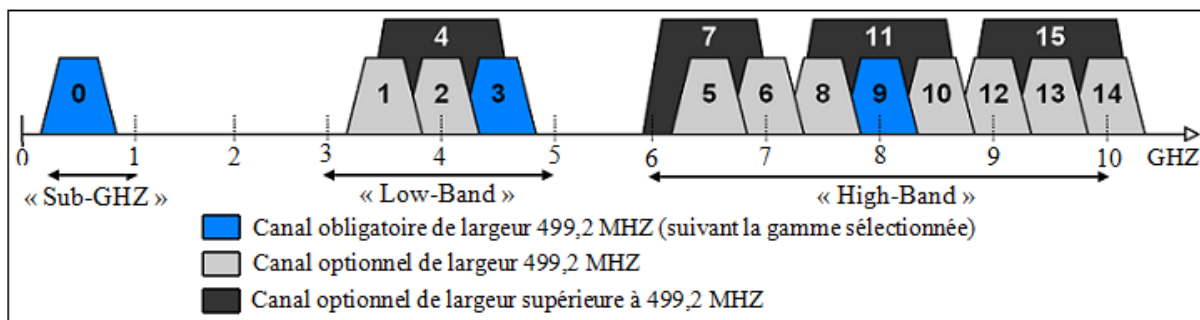


FIGURE 3.25 – Bandes de fréquence de la couche PHY-UWB du standard IEEE 802.15.4a.

Dans le cas de la gamme « Low-Band », le canal obligatoire est le canal 3, centré sur  $4492.8MHz$  et ayant une largeur de bande de  $499.2MHz$  définie dans les termes du standard comme étant la largeur de l'impulsion mesurée à  $3dB$ . Pour ce qui est de la gamme « High-Band », le canal 9, centré à  $7987.2MHz$  et avec une largeur de bande de  $499.2MHz$ , est le canal obligatoire. Notons que dans chaque canal physique, il existe deux canaux logiques définis comme l'association d'un canal physique et d'un préambule. Ceci mène donc à 32 le nombre de canaux logiques disponibles pour l'ensemble des trois gammes.

### 3.4.1.2 Format de la trame

Un diagramme des opérations mettant en évidence les différentes étapes de la mise en forme des données effectuée au niveau de la couche PHY-UWB est présenté dans la figure 3.26. Concernant l'émission, nous retrouvons les parties mise en forme de la trame, encodage, insertion du préambule et génération des impulsions. Pour ce qui est de la réception, le décodage est effectué après synchronisation sur le préambule.

La trame est l'entité la plus complexe en terme de mise en forme des données au niveau de la couche physique. Cette trame est présentée sur la figure 3.27 après encodage, elle est composée de trois composants majeurs qui sont le préambule de synchronisation SHR (*Synchronization Header*) suivi de l'entête PHR (*Physical Header*) puis des données encodées issues du PSDU (*Physical Service Data Unit*) de la couche MAC à travers le SAP (*Service Acces Point*) et notées EPSDU (*Encoded Physical Service Data Unit*).

Le préambule SHR est subdivisé en deux parties distinctes. La première partie est utilisée pour à la synchronisation, l'estimation de canal et la mesure de distance, elle est appelée SYNC (*Synchronization*). La longueur de cette partie varie de 16 à 4096 symboles, chaque symbole étant encodé par un unique code ternaire de longueur 31 ou 127. La seconde partie, nommée SFD (*Start Frame Delimiter*), contient une séquence permettant de délimiter les trames transmises. La modulation utilisée pour ce SHR est de type impulsionnel ternaire, soit  $[+1, 0, -1]$ .

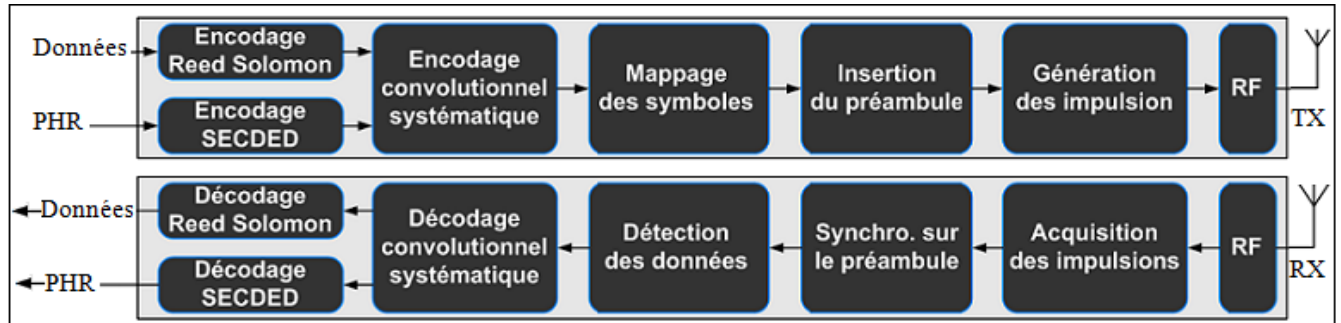


FIGURE 3.26 – Diagramme des opérations de la couche IEEE 802.15.4a PHY-UWB.

Le SHR est suivi par l'entête PHR, ce dernier a pour rôle de transmettre les informations nécessaires au bon décodage des bits de la trame telle que le débit utilisé pour la transmission des données. Le schéma de modulation utilisé pour le PHR est de type BPM-BPSK (*Burst Position Modulation-Binary Phased Shift Keying*), encodé par SECDED (*Single Error Correct, Double Error Detect*).

En fin, les données issues du PSDU sont encodées par un code *Reed Solomon* de type  $(K + 8, K)$  ajoutant 48 bits de parité aux données suivies par un code convolutionnel systématique de type  $R = 1/2$  générant un bit de position et un bit de polarité afin de former l'EPSDU. Ces deux bits sont ensuite modulés par un schéma de type BPM-BPSK. Ces deux codages appliqués au PSDU forment ce que nous appelons communément le codage canal FEC (*Forward Error Correction*).

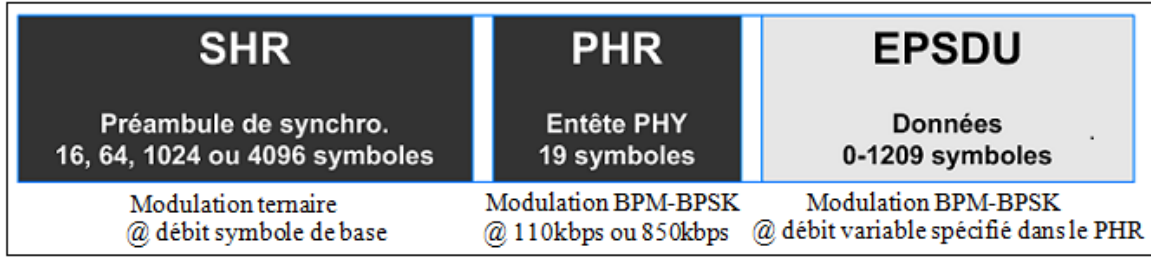


FIGURE 3.27 – Format d'une trame IEEE 802.15.4a PHY-UWB.

### 3.4.1.3 Schémas de modulation et structure d'un symbole

Au niveau du préambule, la modulation utilisée est une modulation impulsionnelle ternaire dans laquelle l'information est codée par la présence ou non d'impulsions puis par le signe de l'impulsion lorsque cette dernière est présente. Concernant le PHR et les données, la modulation mise en oeuvre est de type BPM associée à une modulation de phase de type BPSK. Le terme BPM rappelle une modulation de type PPM dans laquelle les impulsions isolées sont remplacées par un train d'impulsions successives que nous nommerons communément burst.

La figure 3.28 illustre les différents schémas de modulation au niveau de la trame. Que ce soit dans le cas du préambule ou des données, les modulations utilisées permettent au standard de supporter tout type de récepteur, qu'il soit cohérent ou non cohérent. En effet, un récepteur non cohérent n'a a priori pas la capacité de démoduler l'information de phase contenue dans chaque impulsion. C'est pourquoi la modulation de type BPSK est utilisée en complément de la modulation de type PPM afin d'augmenter la robustesse de la modulation mais cette information de phase n'est en aucun cas nécessaire à la démodulation.

Un symbole peut transporter deux bits d'information dans le cas de la modulation de type BPM-BPSK. Le bit systématique, noté  $g_0$ , sert à déterminer la position du burst dans le symbole tandis que le bit de polarité, noté  $g_1$ , est utilisé pour moduler en phase ce même burst. La granularité temporelle de cette modulation est le chip qui représente la durée d'une impulsion, soit environ  $2ns$  dans le cas des canaux obligatoires. Comme l'illustre la figure 3.28, tout symbole modulé en BPM-BPSK d'une durée  $T_{symb}$  est constitué de  $N_c$  chips de durée  $T_c$ , soit la relation  $T_{symb} = N_c T_c$ . Chaque symbole peut ensuite être divisé en deux interstices équivalents de durée  $T_{BPM}$ , soit  $T_{symb} = 2 * T_{BPM}$ . Chacun de ces deux interstices est ensuite composé de deux intervalles : le premier définit les positions possibles du burst tandis que le second permet de créer une bande de garde afin de bien séparer les deux états de la modulation et ainsi limiter l'interférence entre les symboles.

Pour transmettre l'information, un burst de durée  $T_{burst}$ , composé de  $N_{cpb}$  chips ( $T_{burst} = N_{cpb} T_c$ ), est placé dans l'un de ces deux interstices, il est alors modulé en position. A cette première modulation est ajoutée une modulation de phase de ce même burst, laquelle est obtenue en inversant ou non la polarité des impulsions constituant le burst. Par ailleurs, notons que seulement un burst est transmis par symbole. Dans la pratique, la durée d'un burst est largement inférieure à la durée d'un interstice ( $T_{burst} \ll T_{BPM}$ ); ceci autorise un accès multi-utilisateurs par l'emploi d'une séquence de type TH entre les

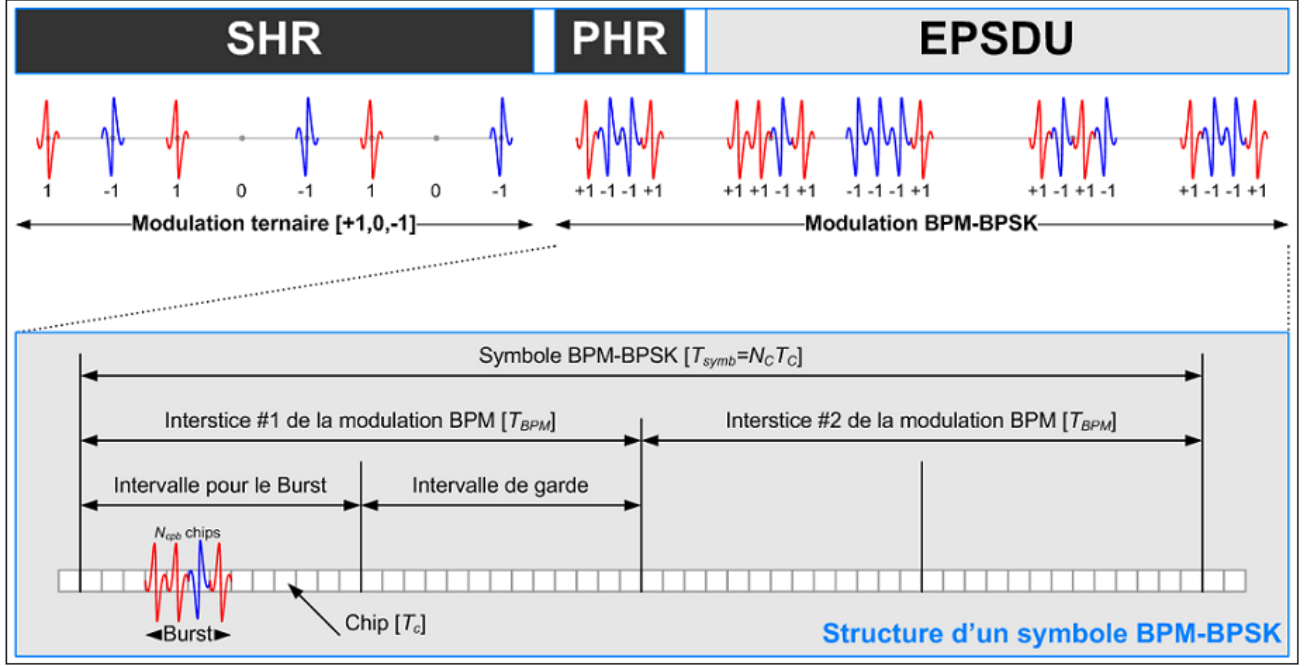


FIGURE 3.28 – Schéma des modulations de la couche IEEE 802.15.4a UWB-PHY.

différentes positions possibles du burst dans l'interstice.

D'un point de vue mathématique, l'expression temporelle d'un  $k^{me}$  symbole  $s^{(k)}$  modulé suivant un schéma BPM-BPSK s'exprime de la manière suivante :

$$S^{(k)}(t) = \left[1 - 2g_0^{(k)}\right] \sum_{n=1}^{N_{cpb}} [1 - 2s_n + kN_{cpb}] \times p(t - nT_c - g_1^{(k)}T_{BPM} - h^{(k)}T_{burst}) \quad (3.43)$$

Avec :

$g_0^{(k)}$  : le bit d'information de position du burst,

$N_{cpb}$  : le nombre de chips par burst,

$s_n + kN_{cpb}$  : la séquence d'étalement durant le  $k$ -ième symbole,

$p(t)$  : l'allure temporelle de l'impulsion transmise,

$T_c$  : la durée d'un chip [s],

$g_1^{(k)}$  : le bit d'information de phase du burst,

$T_{BPM}$  : la durée d'un interstice de la modulation [s],

$h^{(k)}$  : la séquence de type TH,

$T_{burst}$  : la durée d'un burst [s].

### 3.4.2 Spécifications relatives à l'émission

Au niveau de l'émetteur, l'allure de l'impulsion en bande de base transmise  $p(t)$  doit respecter certaines valeurs d'intercorrélacion avec une impulsion de référence  $r(t)$  pour que cet émetteur soit conforme au standard. Mathématiquement, l'intercorrélacion normalisée entre deux signaux est définie par :

$$\Phi(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_p}} \Re \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} r(t) p^*(t + \tau) dt \right] \quad (3.44)$$

Avec :

$\varepsilon_r$  : l'énergie de l'impulsion de référence [J],

$\varepsilon_p$  : l'énergie de l'impulsion transmise [J].

Dans le cas de la couche PHY-UWB, l'impulsion de référence choisie est une impulsion de type *Root Raised Cosine* (RRC) avec un facteur de décroissance  $\beta$  égal à 0.6. Avec  $T_p$  la durée de l'impulsion, l'expression mathématique d'une telle impulsion est la suivante :

$$r(t) = \frac{4\beta}{\pi\sqrt{T_p}} \frac{\cos\left[(1+\beta)\pi\frac{t}{T_p}\right] + \frac{T_p}{4\beta t} \sin\left[(1-\beta)\pi\frac{t}{T_p}\right]}{1 - \left(4\beta\frac{t}{T_p}\right)^2} \quad (3.45)$$

Les densités spectrales de l'impulsion gaussienne, sinusoïdale et carrée sont représentées dans la figure 3.29 pour mettre en évidence l'avantage de l'utilisation de l'impulsion cosinus surélevé (raised cosine). En effet, les densités spectrales des fonctions sinusoïdale et carrée n'occupent que des petites parties de la bande passante fréquentielle allouée pour la transmission dans cette bande. Par contre, la densité spectrale de l'impulsion gaussienne est au dessus du masque spectral imposé par la FCC. La transmission en dehors de cette bande est interdite.

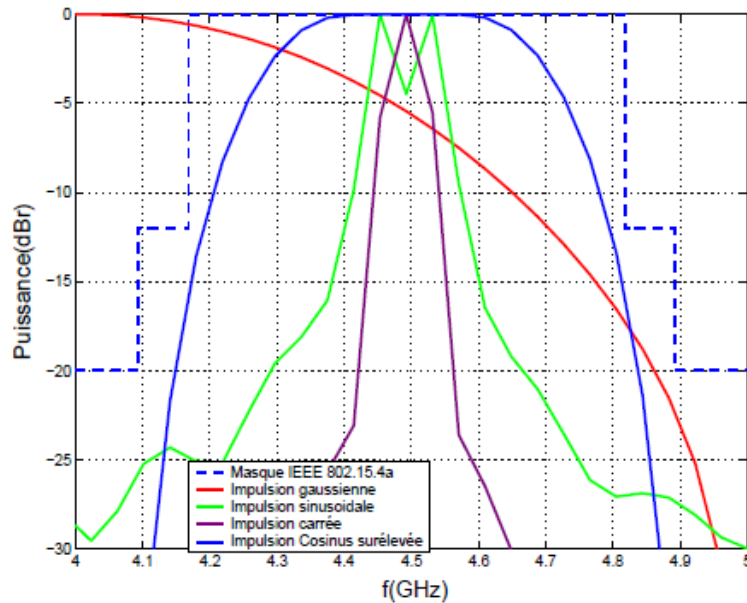


FIGURE 3.29 – Comparaison des densités spectrales de puissances des impulsions usuelles.

## 3.5 Les RCSFs et IR-UWB

### 3.5.1 Avantages

Une question peut se poser sur l'intérêt des communications large bande par rapport à la bande étroite. Un élément de réponse vient du théorème de Shannon qui établit l'expression de la capacité d'un canal de communication [89]. En effet, le théorème montre

que la capacité du canal augmente linéairement avec la largeur de bande du signal et logarithmiquement avec le rapport signal à bruit. Ainsi, il est plus intéressant d'augmenter la largeur de bande pour atteindre des débits importants que d'accroître le rapport signal à bruit. C'est le fondement majeur du "large bande" vis-à-vis des systèmes à bande étroite. Pour les applications bas débit, l'utilisation d'une large bande permet d'établir des communications sur une portée plus importante.

Un deuxième avantage des signaux UWB est leur grande résolution temporelle. Cette propriété rend les systèmes UWB plus robustes aux évanouissements multi-trajets. En effet, le récepteur est plus apte à discerner chacun des trajets [90]. C'est pourquoi la probabilité de recombinaison destructive des trajets est faible. Une autre conséquence fondamentale de la très bonne résolution temporelle des signaux UWB est son exploitation pour la localisation. Ce service est obtenu par la mesure du temps de vol et une précision centimétrique peut être atteinte. Ainsi, la technologie UWB est bien placée pour l'implémentation des systèmes de localisation en environnement indoor [91].

Nous récapitulons dans le tableau 3.4 les principaux avantages et bénéfices des systèmes de communication UWB en bande de base par rapport aux systèmes radio sans fil à bande étroite.

TABLE 3.4 – Principaux avantages et bénéfices des systèmes ULB par rapport aux systèmes à bande étroite.

Avantage de l'ULB Impulsionnelle	Bénéfice par rapport radio bande étroite
<i>Coexistence avec des services de radio à bande étroite et à large bande</i>	<i>Éviter les licences coûteuses</i>
<i>Grande capacité de canal</i>	<i>Haut débit pour supporter de la vidéo haute définition en temps réel</i>
<i>Aptitude à travailler avec un faible SNR</i>	<i>Offre une haute performance dans des environnements bruyants</i>
<i>Faible puissance d'émission</i>	<i>Fournir une sécurité élevée avec une faible probabilité de détection et d'interception</i>
<i>Haute performance en multicanaux</i>	<i>Plus grande puissance du signal dans des conditions défavorables</i>
<i>Architecture simple</i>	<i>Faible coût et consommation</i>

Les avantages pré-mentionnés sont communs pour toutes les communications large bande. Un avantage majeur spécifique de la radio impulsionnelle UWB pour WSN provient de la possibilité de cibler des architectures à faible coût et moindre consommation d'énergie. La transmission des impulsions directement en bande de base simplifie les étages RF de l'émetteur. Contrairement au système radio bande étroite conventionnel, il n'est pas nécessaire avec la radio impulsionnelle d'implémenter les étages de la translation fréquentielle. Ainsi, l'architecture d'émission et aussi de réception des systèmes IR-UWB s'avère relativement simplifiée.

Une comparaison effectuée en [92; 93] et reprise dans le Tableau 3.5 donne les différences entre les techniques de transmission en bande étroite et les techniques ultra large bande radio impulsionnelle.

TABLE 3.5 – Comparaison des techniques bande étroite et ULB.

	Bande étroite	Ultra Large Bande
Effets de la propagation	Sensible au fading	Résistant au fading
Disponibilité du spectre	Faible	Élevée
Implémentation	analogique/Numérique	Tout Numérique possible
Erreur de localisation	27.0%	0.01%
Énergie consommée en émission	40mW	1mW
Énergie consommée en réception	40mW	20mW
Débit	250Kbps	0.85Mbps
Bande passante	1MHz	500MHz
Fréquence centrale	868MHz, 2.4GHz	4GHz, 7GHz

### 3.5.2 Évaluation des performances

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de nos travaux réalisés concernant l'évaluation des performances d'IR-UWB dans les RCSFs. Dans notre premier travail [94], nous avons comparé ces performances par rapport aux performances de la technologie Zigbee. Et dans le second [95], nous avons élargi la comparaison pour couvrir l'étude des performances par rapport aux deux technologies Bluetooth et Zigbee, qui sont les plus répandues dans le domaine des réseaux de capteurs sans fils. Nous avons utilisé l'environnement de simulation OMNet++ bâti à base d'évènements discrets, dont le choix et la présentation seront détaillés dans le chapitre 4. Dans les scénarios de simulation utilisés nous avons déployé un ensemble de nœud sur une zone rectangle de  $400 \times 400$  selon la topologie en maille(Grid Toplogy). Pour tous les scénarios, la station de base est située dans un coin de la zone de simulation. Périodiquement, les nœuds reportent les données concernant le phénomène étudié dans leurs environnement à la station de base. Ils changent périodiquement le mode de fonctionnement de la radio de l'état actif à l'état endormi selon la technologie de transmission sans fil utilisée.

#### 3.5.2.1 Le temps de transmission

Dans la première évaluation, nous comparons le temps de transmission entre Bluetooth, Zigbee et IR-UWB. Le temps de transmission est le temps pendant lequel les capteurs envoient les paquets concernant un phénomène de l'environnement et le temps où la station de base reçoit tous les paquets pour cette information. Ce temps de transmission dépend du débit de données, la taille du message, et la distance entre les nœuds. Il est décrit comme suit :

$$T_{tx} = (N_{data} + \frac{N_{data}}{N_{maxPld} \times N_{ovhd}}) \times T_{bit} + T_{prop} \quad (3.46)$$

Avec :

$N_{data}$  : la taille de données,

$N_{maxPld}$  : la taille maximale du payload,

$N_{ovhd}$  : la taille d'overhead,

$T_{bit}$  : le temps de transmission d'un bit,

$T_{prop}$  : le temps de propagation entre deux nœuds.

Les paramètres typiques des trois technologies de transmission sans fil utilisés sont listés dans le tableau 3.6 :

TABLE 3.6 – Paramètres typiques des trois technologies.

Standard	Bluetooth	IR-UWB	ZigBee
<i>Norme IEEE</i>	802.15.1	802.15.4a	802.15.4
<i>Max data rate (Mbit/s)</i>	0.72	2	0.25
<i>Bit time (<math>\mu s</math>)</i>	0.39	0.009	4
<i>Max data payload (bytes)</i>	339	1020	102
<i>Max overhead (bytes)</i>	58	42	31
<i>Coding efficiency(%)</i>	94.41	97.94	76.52

La figure 3.30 montre le résultat de simulation du temps de transmission en faisant varier la taille de la partie données du paquet. L'axe horizontal représente la taille de la partie données du paquet et l'axe vertical le temps de transmission. Observons cette figure, nous trouvons que Zigbee donne un temps plus important comparé avec Bluetooth et IR-UWB. Cela est dû au faible débit de données (250 Kbit / s) observé pour Bluetooth. Tandis qu'IR-UWB nécessite moins de temps de transmission par rapport aux autres, car les transmissions sont basées sur des impulsions de très bref délai. Dans ces cas, lorsqu'on augmente la taille de la partie données des paquets dans le réseau, il faut évidemment plus de temps pour transmettre chaque paquet à la station de base. Ce qui rend le temps de transmission proportionnel à la taille de la partie données du paquet dans le réseau.

### 3.5.2.2 Consommation d'énergie

La source d'alimentation en énergie est l'une des composantes principales d'un nœud capteur sans fil. Étant donné que c'est un dispositif micro-électronique qui peut seulement être équipé d'une source d'énergie limitée nous avons recours donc à utiliser une batterie. cette dernière joue un rôle critique dans la survie des nœuds capteurs car ils sont déployés en générale dans des zones inaccessibles ou avec moins de contrôle et d'existence humaine. L'énergie devrait par conséquent être intelligemment répartie entre le captage, le calcul, et les communications sans fil selon le besoin. Les capteurs peuvent être hibernés lorsqu'ils sont inactifs. Un bon nombre de recherches courantes se concentrent sur la conception de protocoles et technologies de communication à consommation d'énergie minimale (power-aware) pour les réseaux de capteurs sans fil. Dans ces dernières années, la technologie IR-UWB a été introduite principalement dans le domaine des RCSFs en raison de ses diverses avantages et spécificités, et en particulier sa faible consommation d'énergie. Cela s'est concrétisé par les résultats montrés dans les deux figures ci-après. La figure 3.31

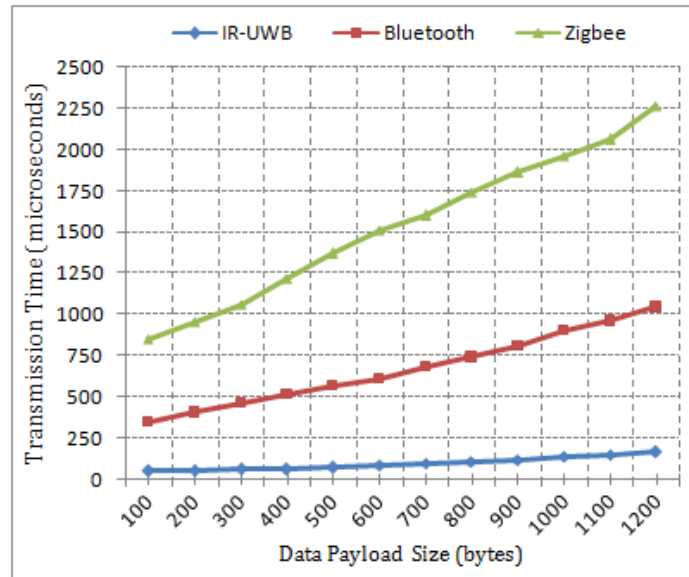


FIGURE 3.30 – Temps de transmission en fonction de la taille de données.

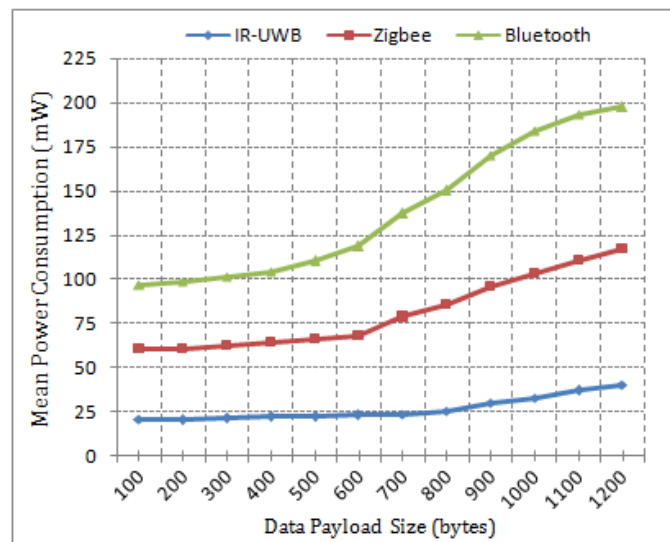


FIGURE 3.31 – Énergie consommée en fonction de la taille de données.

donne la consommation d'énergie moyenne de tous les nœuds du réseau en faisant varier la taille de la partie données des paquets. L'axe horizontal représente la taille de la partie données du paquet et l'axe vertical représente la consommation d'énergie moyenne de tous les nœuds. Cette figure montre clairement que la consommation d'énergie des nœuds à base de la technologie IR-UWB est remarquablement inférieure à celle à base de Zigbee ou Bluetooth.

Lorsqu'on augmente le nombre de nœuds dans le réseau l'énergie consommée augmente, car la congestion du réseau augmente avec le nombre de nœuds et ils doivent attendre donc plus de temps dans leurs modes actifs pour accéder au canal. Aussi ils doivent générer plus de paquets à cause de l'augmentation du nombre de nœuds voisins. Le tous nécessite plus d'énergie, donc comme le montre la figure 3.32 l'énergie consommée augmente avec le nombre de nœuds.

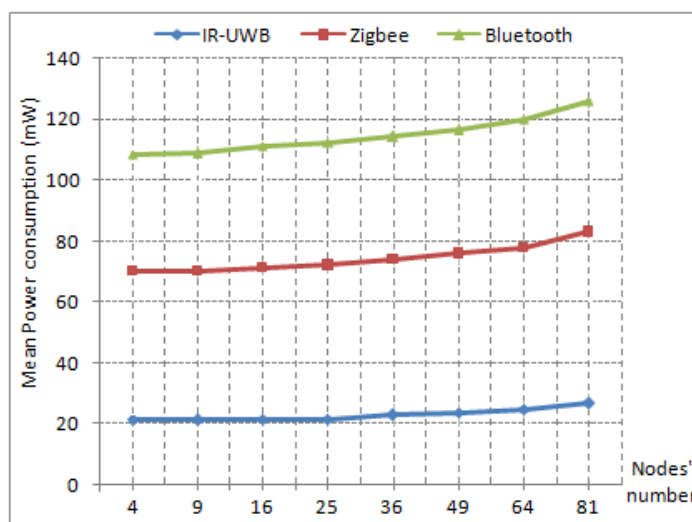


FIGURE 3.32 – Énergie consommée en fonction du nombre de nœuds.

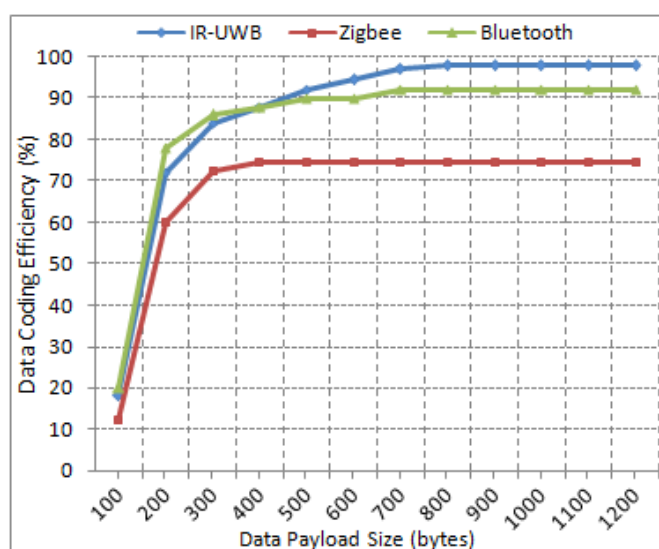


FIGURE 3.33 – L'efficacité du codage des données en fonction de la taille.

### 3.5.2.3 Efficacité du codage de données

L'efficacité de codage de données est définie comme étant le rapport de la taille des données et la taille du message (par exemple, le nombre total d'octets utilisés pour transmettre les données). La formule du pourcentage d'efficacité de codage de données peut être décrite comme suit :

$$P_{codEff} = N_{data} / (N_{data} + (N_{data} / N_{maxPld} \times N_{ovhd})) \quad (3.47)$$

Nous avons utilisé les paramètres listés dans le tableau 3.6 pour la comparaison de l'efficacité du codage. La figure 3.33 montre l'efficacité de codage des données des trois technologies de transmission sans fil par rapport à la taille des données. Pour les petites tailles de données (environ plus petit que 400 octets), Bluetooth et IR-UWB sont la meilleure solution. En outre, ZigBee a une bonne efficacité pour des données d'une taille inférieure à 200 octets. Pour de grandes tailles de données, IR-UWB a beaucoup plus de

efficacité de plus de 97%, par rapport à ZigBee avec 74.42% et 92.13% avec Bluetooth.

Pour un réseau de capteurs sans fil dans un système d'automatisation, puisque les tailles des données de surveillance et de contrôle industriel sont généralement de petite taille, (par exemple, les données de température dans un système de surveillance de l'environnement peuvent nécessiter seulement moins de 4 octets), Bluetooth peut être un bon choix (au point de vue efficacité du codage des données). Mais il est caractérisé par son débit de données lent, ainsi qu'il consomme plus d'énergie par rapport à IR-UWB. Pour ces dernières raisons, l'utilisation d'IR-UWB est favorisée dans ce contexte.

### 3.6 Conclusion

Les technologies de communication sans fil émergent ces dernières années. Ils offrent de grandes possibilités en termes d'optimisation de la consommation d'énergie et de réduction des coûts. Après la réglementation américaine, l'UWB se réfère à une bande de fréquence plus qu'une technologie particulière. Cette réglementation a permis l'essor de l'IR-UWB et une convergence vers une sous-bande disponible à l'échelle mondiale est possible malgré la complexité du processus. Les atouts de cette technologie sont la résistance aux évanouissements, l'architecture simplifiée des capteurs, la faible consommation énergétique, la possibilité de la réutilisation des fréquences...

IR-UWB a été introduite principalement dans le domaine des RCSFs en raison de ses multiples spécificités et avantages, notamment sa faible consommation d'énergie et sa faible complexité.

Dans ce chapitre, et après avoir présenté la forme d'un signal UWB, nous avons mis l'accent sur la technologie IR-UWB ainsi que sur l'impact et le gain apporté par son utilisation dans le domaine des RCSFs. Cela en termes de temps de transmission, d'efficacité du codage de données et de consommation d'énergie par rapport aux technologies Bluetooth et Zigbee. Les résultats obtenus avec la technologie IR-UWB montre concrètement ses avantages listés précédemment.

L'absence de protocoles appropriés de la couche MAC dédiés à cette technologie ainsi que notre volonté à mieux exploiter les caractéristiques et les avantages de cette dernière, tous ça nous a poussé et encouragé à étudier les protocoles existants afin d'élaborer et concevoir un protocole adapté à cette nouvelle technologie. Partant, le chapitre 3 présentera une étude des familles de protocoles MAC existants pour les RCSFs à base d'IR-UWB en mettant l'accent en particulier sur le protocole WideMac.

## 4.1 Introduction

Afin de concevoir un protocole MAC mieux adapté aux spécificités des RCSFs basés sur la technologie IR-UWB, on doit prendre en considération la propriété d'optimisation d'énergie. Cette propriété est considérée comme la plus importante dans le cas des RCSF. En effet, il faut noter que c'est difficile en pratique de changer ou de recharger les batteries des nœuds capteurs. Ceci constitue un vrai handicap qui rend la consommation énergétique un paramètre clef influençant directement la durée de vie des capteurs. En plus, la couche MAC contrôle les activités de la radio qui est à son tour considérée comme étant la principale source de consommation d'énergie. La couche MAC doit gérer donc de façon optimale cette consommation en empêchant les pertes possibles d'énergie résultants d'une mal gestion des états de la radio. Plusieurs recherches ont été menées afin de gérer efficacement cette dernière ressource et optimiser ainsi la consommation énergétique. En effet, un protocole MAC efficace en énergie ne doit utiliser le module radio en son mode actif qu'on cas d'un vrai besoin et évite aussi son inutile utilisation qui provient de 5 sources essentielles : l'overhearing, les collisions, l'Idle, les envois infructueux et les messages de contrôle. Pratiquement, le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie donc est de mettre la radio du nœud capteur en mode veille (*low-power*) à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire. Idéalement, la radio doit être éteinte dès qu'il n'y a plus de données à envoyer et ou à recevoir, et doit être prête dès qu'un nouveau paquet de données doit être envoyé ou reçu. Ainsi, les nœuds alternent entre périodes actives et sommeil en fonction de l'activité du réseau. Ce comportement est généralement dénommé *Duty-cycling* ou *wake-up* scheme.

Le mécanisme du *Duty-cycling* permet la réduction à la fois du temps qu'un nœud passe dans l'état d'écoute passive (*Idle listening*), de l'*overhearing* et d'autres activités inutiles en mettant le nœud dans l'état de sommeil. Ce mécanisme est utilisé par pas mal de protocoles MAC, et récemment a été exploité dans la conception du nouveau protocole WideMac dédié à la technologie IR-UWB. Ce dernier met en veille de façon asynchrone le module radio afin de réduire la consommation, et annonce périodiquement la présence à l'aide des balises. Cet annonce permet aux nœuds du réseau de découvrir les moments de réveil respectifs et d'échanger donc des paquets.

Le présent chapitre exposera le rôle et le fonctionnement de la couche MAC dans les RCSFs. Ensuite, il présentera les protocoles MAC existants dédiés à la nouvelle technologie Radio impulsionnelle UWB. Après, il mettra l'accent en particulier sur les deux protocole

ALOHA et WideMac, et présentera l'évaluation de leurs performances énergétique dans les RCSFs à base d'IR-UWB. Finalement le chapitre est terminé par une conclusion.

## 4.2 Particularités des protocoles MAC dédiés aux RCSFs

La minimisation de l'énergie consommée par un nœud dans un RCSF est très cruciale. Partant, le concepteur de protocoles MAC pour ce type de réseaux doit identifier les principales sources de gaspillage d'énergie et les réduire. Ces sources ont été abondamment étudiées, comme dans [96; 97; 98], et sont souvent considérées dans les publications traitant de nouveaux protocoles MAC pour les réseaux de capteurs. Parmi ces sources de perte d'énergie, nous trouvons :

- **L'écoute active (Idle listening)** : Dans un réseau sans fil asynchrone et sans précaution spécifique, la couche MAC ne peut pas prédire l'arrivée d'un paquet. La radio d'un nœud reste ainsi allumée (et consomme) dans l'attente d'un hypothétique paquet. Pour éviter ce problème, il faut basculer les nœuds dans le mode sommeil le plus possible.
- **La retransmission** : La transmission simultanée des données provenant de plusieurs capteurs peut produire des collisions et ainsi une perte de l'information transmise, car les nœuds capteurs possèdent en général une seule antenne radio et partagent le même canal de transmission. Donc une perte significative de l'énergie peut engendrer à cause de la retransmission des paquets perdus.
- **La surécoute (overhearing)** : Comme le montre la figure 4.1, le phénomène de surécoute se produit quand un nœud reçoit des paquets qui ne lui sont pas destinés. Et puisque le médium de communication est partagé par les nœuds d'un même voisinage, un paquet envoyé à un destinataire sera détecté par ses voisins et provoquera pour eux une dépense d'énergie inutile. L'impact de cet effet est fonction de la densité du réseau et de la portée radio des nœuds.

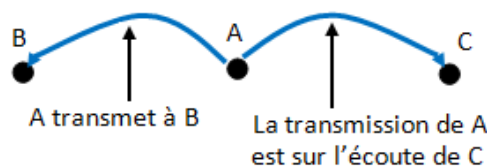


FIGURE 4.1 – La surécoute dans une transmission.

- **La surcharge (overhead)** : Plusieurs protocoles de la couche MAC fonctionnent par échange de messages de contrôle pour assurer différentes fonctionnalités : signalisation, connectivité, établissement de plan d'accès et évitement de collisions. Tous ces messages nécessitent une énergie additionnelle.
- **La surémission (overemitting)** : Le phénomène de surémission se produit quand un nœud capteur envoie les données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. En effet, les messages envoyés sont considérés inutiles et consomment une énergie additionnelle.
- **La taille des paquets** : La taille des messages échangés dans le réseau a un effet

sur la consommation d'énergie des nœuds émetteurs et récepteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit être ni trop élevée ni trop faible. En effet, si elle est petite, le nombre de paquets de contrôle (acquiescement) générés augmente l'overhead. Dans le cas contraire, une grande puissance de transmission est nécessaire pour des paquets de grande taille.

Dans le cas d'un réseau à bas débit, l'analyse des chiffres de consommation de circuits radio montre que l'*idle listening* s'avère être la cause du plus gros gaspillage d'énergie [99]. En effet, le rapport des consommations du circuit entre le mode actif (émission ou réception) et le mode inactif s'échelonne entre 3 et 4 ordres de grandeurs selon les circuits considérés. Ce constat implique que tous les protocoles MAC pour un réseau de capteurs ont comme point commun le fait de forcer les nœuds à endormir leur radio pour atténuer le phénomène d'*idle listening*.

### 4.3 Familles de protocoles MAC efficaces en énergie

Entre les années 2002 et 2007, les travaux de recherche dans la couche MAC des réseaux de capteurs sans fils ont connu un essor excessivement important. A la fin de cette période, de grandes familles de protocoles de la littérature ont vu le jour et nous nous limiterons à une taxonomie articulée autour des familles suivantes :

- protocoles à ordonnancement,
- protocoles à découpage temporel,
- protocoles à échantillonnage de préambule.

Le choix adéquat d'un protocole dépend notamment de la charge de données à laquelle le réseau doit faire face. Par exemple, un protocole à ordonnancement est préférable avec une charge élevée car il utilise une stratégie efficace d'allocation de ressources. par contre, lorsque le nombre de paquets émis dans le réseau diminue, le maintien de la synchronisation des nœuds entraîne un gaspillage d'énergie [100].

#### 4.3.1 Protocoles à ordonnancement

Cette famille de protocoles utilise un ordonnancement des émissions des paquets pour réduire la part de contention pure dans l'accès au canal. Si l'ordonnancement est centralisé par un nœud, on parle de protocole coordonné ; dans le cas contraire, on parle de protocole distribué.

La norme IEEE 802.15.4 [101] est un exemple de protocole coordonné qui propose l'organisation temporelle représentée sur la figure 4.2. Le réseau est coordonné par les balises générées par un nœud particulier qui synchronise tous les nœuds qui lui sont associés. Cette balise sert à délimiter les frontières temporelle des super-frames qui serviront à l'organisation temporelle du réseau. Deux portions caractérisent la super-trame, une portion active et une autre inactive. La portion active est composée de deux périodes : la première est appelée CAP (pour *Contention Access Period*), et elle permet aux nœuds d'envoyer des paquets avec une politique de contention classique. L'autre, appelée CFP (pour *Contention Free Period*), est composée de périodes GTS (*Guaranteed Time Slots*) réservées à un nœud. Chaque balise permet au coordinateur de spécifier les longueurs des

différentes périodes de la super-trame (active, inactive, CAP, CFP) et de décrire le contenu des GTS. L'avantage de ce protocole est sa grande flexibilité car en cas de faible trafic sur le réseau, le coordinateur peut raccourcir la période active, ou dans le cas contraire multiplier les GTS au détriment de l'endormissement des nœuds. Des nouvelles propositions de protocoles coordonnés similaires au protocole 802.15.4 font intervenir un ensemble de nœuds comme coordinateurs au moyen d'une élection régulière [102].

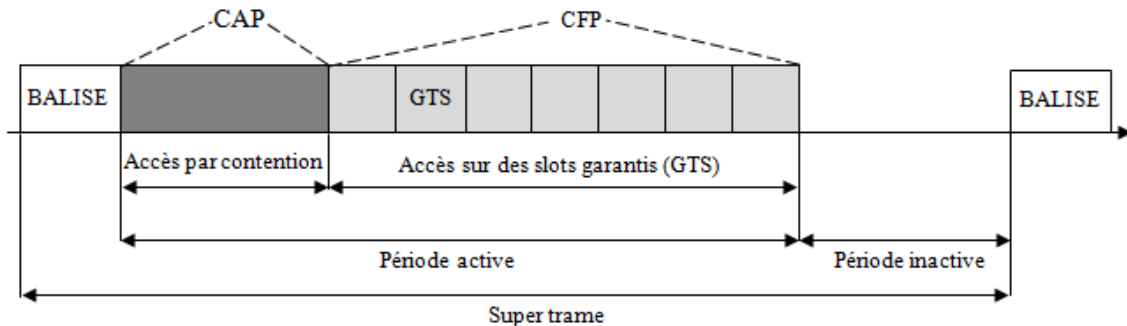


FIGURE 4.2 – Découpage temporel de la super-trame de la norme IEEE 802.15.4

L'ordonnancement centralisé est plus adapté à une topologie de réseau plate dans laquelle, à l'exception du puits, tous les nœuds ont des comportements identiques, à savoir émettre leurs paquets et au besoin, relayer les paquets des autres nœuds pour atteindre le puits. Dans le cas d'un trafic élevé, il faut définir un ordonnancement distribué de l'accès au canal pour ce genre de réseau. Par exemple le protocole TRAMA est bâti sur une période active, une période d'accès aléatoire (par contention) et une période d'accès ordonnancé composée de slots [103]. Ce protocole fait l'hypothèse que tous les nœuds sont synchronisés et envoient régulièrement dans la portion d'accès aléatoire, un paquet faisant l'historique des paquets qui ont transité par lui ainsi que la liste de ses voisins. Grâce à ces informations et à une fonction de *hashage* distribuée, le réseau s'organise en groupe de nœuds (ou *clusters*) de telle sorte que dans un voisinage à 2 sauts, les slots sont attribués aux nœuds, en fonction de la charge de trafic qu'ils sont susceptibles de véhiculer (estimée grâce aux paquets d'historiques de trafic).

Dans la même idée, le protocole LMAC attribue des slots aux nœuds d'un voisinage à 2 sauts [104] de manière distribuée. A chaque début de slot, un nœud va systématiquement communiquer la liste des slots attribués à ses voisins (à 2 sauts) par son préambule. Lorsque le nœud a un paquet à émettre, il le transmet à la suite de ce préambule. Chaque nouveau nœud arrivant dans le réseau doit au préalable écouter les préambules de chaque slot, en déduire quels sont les slots non attribués dans son 2-voisinage puis choisir l'un d'eux aléatoirement. Ce protocole prévoit un mécanisme qui corrige le problème du choix du même slot. Ce même protocole est limité en terme de densité de nœuds car une fois que tous les slots sont attribués, aucun nouveau nœud ne peut rentrer dans le réseau. Pour pallier à ce problème et grâce à l'usage de canaux fréquentiels additionnels, une variante a été proposée pour remédier à cela en augmentant le nombre de slots disponibles [105].

### 4.3.2 Protocoles à découpage temporel

Dans ce type de protocoles, les nœuds d'un réseau se synchronisent pour alterner des périodes de sommeil et des périodes actives dans lesquelles les nœuds accèdent au canal par contention. L'idée de base pour ce type de protocole repose sur l'exploitation du faible trafic dans un réseau de capteurs, et ce dernier peut être acheminé selon un schéma classique d'accès au canal condensé dans une période active. En même temps, il permet aux nœuds d'éteindre leur radio et préserver leur batterie. La première implémentation se réfère à S-MAC [106]. Ce protocole spécifie que la phase active des nœuds se compose d'une portion dédiée à l'échange des paquets, précédée par une portion dédiée à la (re)synchronisation par diffusion d'un message qui annonce la date du prochain réveil. Comme le montre la figure 4.3, l'émission des paquets dans la période active (synchronisation et données) est basée sur un découpage du temps en slots, menant ainsi à la réduction de la probabilité de collision.

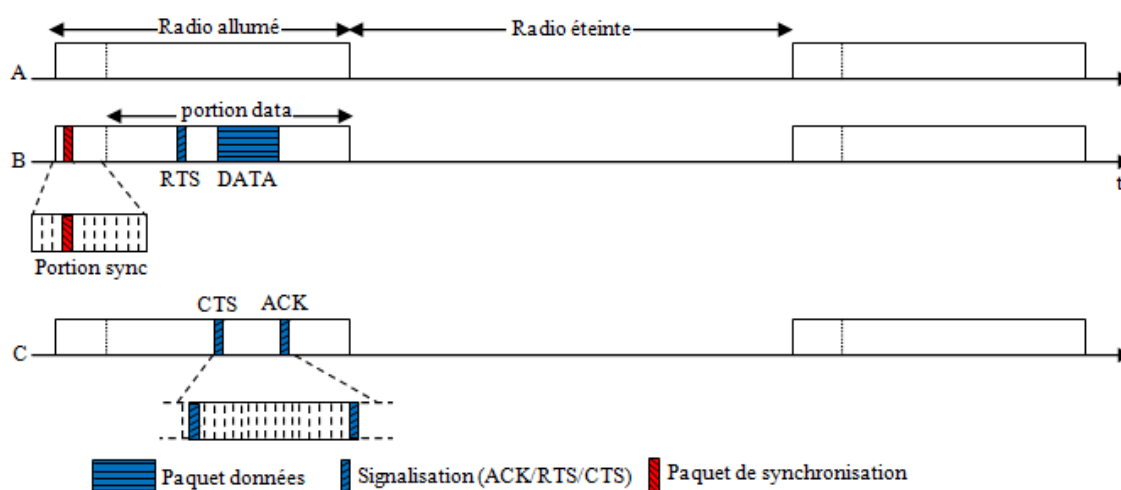


FIGURE 4.3 – Exemple de protocole à découpage du temps synchronisé

Ce schéma pose un problème pour la latence en cas de transmission multi-sauts puisque pour chaque saut, il faut attendre la prochaine phase active pour émettre le paquet. Ce problème a été contourné dans 2 variantes de S-MAC :

- Afin de favoriser le relais de messages multi-sauts, les auteurs de [107] proposent un mécanisme d'écoute adaptative. Il consiste à réveiller les nœuds voisins de l'émetteur et du destinataire du paquet pendant un petit laps de temps après la transmission, pour permettre de court-circuiter la prochaine fenêtre de réveil.
- L'agencement des périodes de réveil le long de l'arbre des relais jusqu'au puits est l'idée de base derrière le travail des auteurs de [108]. L'agencement est réalisé de telle sorte que la phase active du relais  $n$  soit immédiatement suivie de la phase active du relais  $n + 1$ .

Dans cette famille de protocoles, si le trafic diminue, l'*idle listening* devient problématique ; alors que s'il augmente, les collisions vont se multiplier et engendrer un engorgement. Pour adresser le premier point, [109] propose d'inclure un mécanisme de time out tel qu'après avoir constaté une certaine durée d'inactivité sur le canal, un nœud s'endort jusqu'à sa prochaine période active. Pour le deuxième point, les auteurs de [110] ont

introduit la possibilité qu'un ou plusieurs nœuds modifient dynamiquement leur facteur d'activité en fonction de leur activité.

### 4.3.3 Protocoles à échantillonnage de préambule

L'échantillonnage de préambule se bas sur le principe suivant : les nœuds sont endormis et se réveillent périodiquement durant un très court instant pendant lequel ils écoutent le canal à la recherche d'un préambule. Si le canal est libre, ils éteignent leur radio, jusqu'à la prochaine phase d'écoute ; dans le cas contraire, ils restent éveillés pour démoduler les données transmises après le préambule. Les nœuds partagent la même période de sondage de canal, appelée  $T_{CI}$ , mais ne se réveillent pas de manière coordonnée. Par cette écoute périodique, les nœuds limitent l'écoute inutile d'un canal inoccupé mais reportent la charge de l'émission d'un paquet sur l'émetteur, qui doit s'assurer que son destinataire est éveillé pour recevoir les données. Pour ce faire, ce dernier va émettre un préambule au moins aussi long que  $T_{CI}$  qui sera détectable par le destinataire (ainsi que tous les nœuds du voisinage), permettant la réception des données. La figure 4.4 explique le fonctionnement de ce mécanisme.

En réalité, l'échantillonnage de préambule se voit plus adapté à un mécanisme de la couche physique, capable de réveiller le destinataire, plus qu'un protocole MAC, dans le sens où il peut être utilisé avec différents types d'accès au canal. D'ailleurs, cette famille de protocoles est originaire des deux travaux [111; 112] qui proposent dans chaque cas un protocole MAC reposant sur ce principe ; le premier se base sur la méthode d'accès ALOHA et l'autre sur le CSMA. Quoiqu'il en soit, cette approche est très originale puisqu'elle déporte la dépense énergétique de l'émission d'un paquet sur l'émetteur, en laissant les nœuds économiser leur énergie en l'absence de trafic sur le canal. C'est pour cette raison que cette famille de protocoles est particulièrement adapté aux réseaux à faible débit.

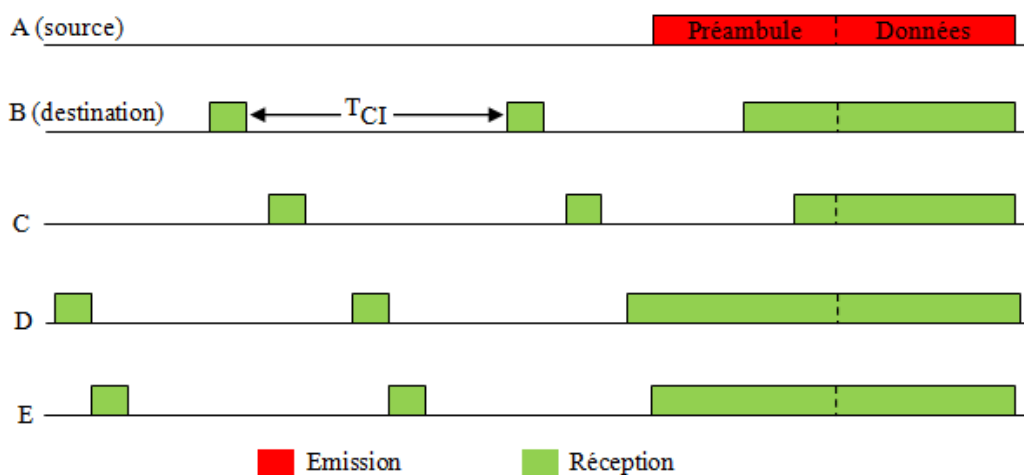


FIGURE 4.4 – Protocole à échantillonnage de préambule.

Parmi les améliorations proposées concernant l'échantillonnage de préambule nous citons :

- WiseMAC [113] utilise un accès par CSMA et propose que le destinataire envoie dans son acquittement l’instant de son prochain réveil. Comme ça, l’émetteur peut déclencher l’émission d’un nouveau paquet pour le même destinataire au moment où ce dernier se réveille, réduisant grandement la taille du préambule. Le rendement de WiseMAC augmente avec l’augmentation du trafic réseau car l’estimation de l’instant de réveil du destinataire peut être faite avec précision.
- MFP [114] utilise un accès au canal par CSMA et un préambule composé de micro-trames servant à annoncer le prochain paquet de données. Une micro-trame contient, en plus d’un entête de synchronisation, des champs de contrôle tels que les adresses de la source et du destinataire, un descripteur du paquet et surtout un compte à rebours qui indique le temps qui le sépare de l’arrivée des données. A la détection d’une micro-trame, Un nœud peut donc soit découvrir que le paquet ne lui est pas destiné et se rendormir, soit dans le cas contraire éteindre sa radio et la rallumer pour recevoir les données. MFP permet donc d’éviter le phénomène d’overhearing et aussi de limiter la dépense énergétique liée à l’écoute du préambule restant.
- Les protocoles CSMA-MPS [115] et X-MAC [116] utilisent le même principe d’émission de préambule composé de micro-trames mais séparées par un court intervalle pendant lequel l’émetteur écoute un éventuel acquittement du destinataire lui signifiant qu’il est réveillé et prêt à recevoir les données. A la réception de l’acquiescement, l’émetteur arrête l’émission du préambule et peut émettre les données.

A partir de cette étude bibliographique des protocoles MAC efficaces en gestion d’énergie pour les RCSFs, on peut dire que la contrainte de minimisation de la consommation d’énergie demande à ce que l’accès au canal soit en accord avec un comportement périodique de l’extinction du module radio du nœud. En plus, Le débit circulant sur le réseau régit à la fois le rapport cyclique de l’activité de la radio et la synchronisation des périodes actives des nœuds. La section suivante présente les protocoles MAC pour la radio impulsionnelle UWB.

## 4.4 Protocoles MAC et IR-UWB

Une étude complète des protocoles MAC pour la radio impulsionnelle UWB a été présentée en détail dans [117]. Dans cette section nous donnerons une synthèse réduite, illustrant trois grandes approches qui nous semblent représentatives de la littérature :

- Études basées sur une expression de la capacité du réseau,
- Études proches du CDMA, par répartition des codes de saut,
- Études tirant parti de la connaissance de la nature impulsionnelle de la radio.

### 4.4.1 Protocoles basés sur l’expression de la capacité

La radio impulsionnelle avec saut temporel dans la couche physique d’un réseau ad hoc a été considérée dans [118]. La formule du SINR exprimée par Scholtz et Win dans [119] a été reprise dans ce premier travail, et considère l’hypothèse gaussienne des interférences d’accès multiple. Le protocole MAC distribué décrit à partir de cette formule prend en compte deux cas de figure : un fonctionnement en bande réservée (RB) et un autre en

bande dynamique(DB). Le mode RB est caractérisé par un débit fixe et une puissance d'émission soumise à "négociation" avec le destinataire et les nœuds avoisinants. cette négociation permet de calculer la puissance maximale à utiliser pour la transmission. En mode DB, les échanges se basent sur une adaptation des débits pour offrir une chance aux autres nœuds pour émettre leurs paquets.

Les auteurs de [120] déterminent la distance d'exclusion dépendante de la bande et du débit considérés dans un réseau et montrent que contrairement à un signal à bande étroite, UWB tolère des interférences. Partant, Ils ont proposé un protocole MAC proche du 802.11. Il prend en compte la distance d'exclusion pour ignorer un paquet RTS ou CTS si le nœud est au-delà de cette distance. Le test d'appartenance à la zone d'exclusion autour d'un nœud recevant un paquet a été rendu possible grâce à la capacité d'UWB à mesurer finement la distance.

la contribution des interférences dans le SINR a été montrée comme négligeable dans[121] à l'aide de l'expression de la capacité de Gupta [122] et de la très grande largeur de bande des signaux radio impulsionnelle UWB. Du point de vue MAC avec une grande largeur de bande, il n'est pas nécessaire d'utiliser un ordonnancement des transmissions des nœuds et qu'au contraire ces derniers peuvent émettre simultanément, sans contrôle de puissance. C'est Cette conclusion qui a donnée naissance au principe de la répartition des codes de saut temporel des nœuds pour accéder au canal.

#### 4.4.2 Protocoles basés sur une utilisation des codes de saut

Cette famille de protocoles repose sur le concept d'accès multiple grâce au code de saut temporel IRMA( *impulse radio multiple access*). La majorité des protocoles MAC pour une radio TH-UWB proposent de séparer les paquets de contrôle des paquets de données par l'utilisation d'un code commun et de codes dédiés. Ces derniers peuvent être alloués de manière statique ou dynamique. Dans le premier cas, le code de saut utilisé pour les données est majoritairement celui du récepteur. Pour que tout nœud garde une information à jour des codes de ses voisins, les nœuds doivent émettre des paquets périodiquement. Dans le deuxième cas, le code pour porter les données est choisi aléatoirement dans un ensemble de codes disponibles; cela nécessite que le destinataire ou l'émetteur spécifie quel code sera utilisé pour la transmission des données dans les paquets d'initiation de la transaction (RTS/CTS).

Une proposition très proche du CDMA a été présentée dans [123], où les nœuds accèdent au canal selon le protocole ALOHA et l'initiation d'une communication est réalisée par un échange de paquets de RTS/CTS. Ces paquets portent un code de saut temporel de contrôle commun à tous les nœuds, ce qui facilite la détection d'un paquet arrivant en utilisant un filtre adapté à ce code sur le récepteur. Dans le paquet RTS, l'émetteur indique au récepteur le code de saut choisi pour le paquet de données. Si le destinataire est disponible, il répond par CTS à l'émetteur qu'il est prêt à recevoir et commute son récepteur pour recevoir le code indiqué par l'émetteur.

Dans le même sens, [124] présente un protocole MAC qui met en jeu des communications initiées par le récepteur. Chaque nœud prêt à recevoir des données, envoie à ses voisins un paquet de RTR (*Ready To Receive*) auquel répondront, par un paquet RTS,

ceux d'entre eux qui auront un message à lui transmettre. Ce paquet RTR inclut un champ qui précise le code de saut, choisi aléatoirement par l'initiateur, que doivent utiliser les nœuds pour la communication. L'initiateur reçoit, pendant une fenêtre de contention, les différents RTS et sélectionne parmi eux l'expéditeur de son choix en lui envoyant un CTS. [125] est également construit sur ces mêmes principes d'initiation par le récepteur et de séparation des canaux de données et de contrôle, se réclamant explicitement du protocole MACA-BI [126]. Comparé à [124], ce protocole minimise le sur-coût énergétique dû à l'échange des paquets de signalisation.

#### 4.4.3 Protocoles exploitant la nature impulsionnelle des signaux

Dans cette section nous exposons les protocoles qui représentent le résultat d'exploitation des particularités de la nature impulsionnelle des signaux UWB.

Le domaine des communications tactiques était le premier à mettre en application la technologie UWB. Dans ce contexte, le papier [127] décrit une couche MAC avec l'utilisation conjointe de deux aspects marquants de l'UWB : coût énergétique de l'acquisition de synchronisation et variabilité du débit. Ce papier a dressé comme objectif la minimisation du coût de la synchronisation avec maintien des liens entre les nœuds, et même entre les paquets. Pour cela, ce protocole emploie le contrôle du débit de l'UWB et transmet plus d'impulsions par bit. Ainsi les paquets de données sont émis à débit maximum avec des petits paquets de contrôle émis à faible débit qui séparent deux paquets pour maintenir leur synchronisation. Ce protocole est plus adapté à des communications en peer-to-peer impliquant des débits de paquets substantiels.

D'autres aspects de l'UWB sont discutés dans [128] et [129]. Ces deux travaux proposent l'idée d'occupation du canal par un signal du destinataire alors qu'il reçoit le paquet de l'émetteur. Ce concept issu de [130] empêche les nœuds voisins du destinataire d'émettre lorsque ce dernier est en train de recevoir un paquet. Ce concept évite l'usage de paquets de signalisation comme les RTS/CTS ou ACK.

Enfin, Ruben Merz de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) a proposé dans sa thèse une nouvelle couche MAC appelée DCC-MAC dédiée à un réseau ad hoc UWB[131; 132]. DCC-MAC est caractérisé principalement par :

- Un débit réseau optimisé et donc un contrôle de puissance non optimal,
- Un accès aléatoire au canal devient alors possible dans le cas d'un récepteur capable d'annuler les interférences multi-utilisateurs,
- Utilisation hybride des codes de saut : à l'initialisation de la communication, l'émetteur envoie un paquet d'invitation avec le code de saut du récepteur ; le reste de la communication est régi par un code de saut privé obtenu à partir de la concaténation des adresses MAC de l'émetteur et du récepteur.

Finalement, la norme IEEE 802.15.4a [88] a été définie comme une couche physique alternative pour les WPAN bas débit. Quelques aménagements ont été apportés à l'IEEE 802.15.4 pour prendre en compte les spécifications de la radio UWB. Par exemple, la couche MAC du 802.15.4 classique définit une période d'accès par contention dans la portion CAP de la super-trame (figure 4.2) ; l'algorithme CSMA de la norme IEEE 802.15.4 autorise les nœuds à accéder au canal après avoir constaté que le canal est libre. Avec

l'impossibilité du CCA par détection de porteuse en UWB, le nouveau standard l'IEEE 802.15.4a propose deux options pour pallier à ce problème :

- Un accès par ALOHA pour un réseau à très faible débit. Cette option est justifiée par la possibilité de la démodulation de deux paquets pourtant en collision dans la couche physique UWB.
- Dans un réseau chargé avec une probabilité de collisions inhérente à ALOHA non tolérée, ce standard a proposé un mécanisme pour diminuer la probabilité de non détection d'un canal occupé. Selon cette proposition publiée dans [133], des portions de préambule de synchronisation sont multiplexées aux données. Ce multiplexage est fait sur la durée réservée à un CCA, et vise une détection plus simple de ces portions par rapport aux données modulées.

## 4.5 Protocole ALOHA

### 4.5.1 présentation

Ce protocole a été développé à l'université de Hawaï en 1970 [134]. Le principe de ce protocole est simple : chaque nœud du réseau partage en même temps une même bande de fréquence pour communiquer. Il n'existe ni mécanisme de synchronisation entre les nœuds ni écoute préalable du canal. Cela implique qu'il n'y a pas d'allocation de ressources pour une ou plusieurs nœud du réseau. Donc les nœuds transmettent sans se préoccuper de l'état du canal, l'absence d'acquiescement indique à l'émetteur que la trame transmise est mal reçue. La reprise se fait donc par l'utilisation de la technique ARQ (*Automatic Repeat Request*).

Le protocole ALOHA existe en deux versions [135], une version slottée (Slotted ALOHA (Figure 4.5)) et une version non slottée (UnSlotted ALOHA (Figure 4.6)).

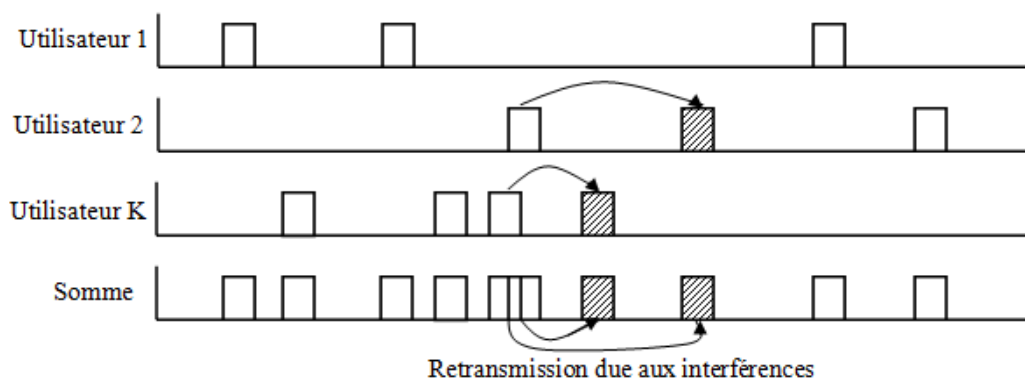


FIGURE 4.5 – Illustration de la technique UnSlotted ALOHA.

### 4.5.2 diagrammes de transition

#### 4.5.2.1 Unslotted ALOHA

Comme décrit le diagramme de transition de la figure 4.7, lorsqu'un nœud désire émettre un PDU, elle le transmet directement sur l'interface radio si celle-ci n'est pas déjà

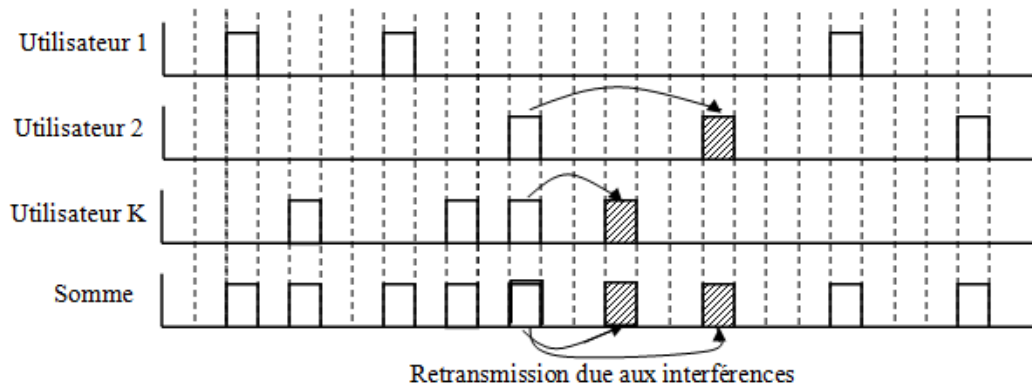


FIGURE 4.6 – Illustration de la technique Slotted ALOHA.

utilisée en émission. Après l'envoi, un timer de retransmission est déclenché. On se met donc dans un état d'attente d'accusé de réception du PDU émis. Si l'accusé de réception du PDU courant est reçu avant l'expiration du timer, celui-ci est désactivé puis on vérifie si la file d'attente des paquets provenant de la couche réseau destinés à cette interface n'est pas vide. Si c'est le cas, on choisit le premier paquet en tête de file, puis on l'encapsule dans un MAC-PDU que l'on transmet. La priorité est donc de type premier arrivé premier servi. Sinon, on se met en attente d'émission de paquet. A la fin de la réception totale d'un PDU bien reçu par l'interface radio, le processus de désencapsulation est effectué : retrait de l'entête MAC, puis envoi du PDU à la couche réseau si on est destinataire.

Dans le cas de l'expiration du timer de retransmission avant la réception de l'accusé de réception on retransmet le PDU émis. Une borne maximale de retransmission a été définie pour éviter la transmettre indéfiniment d'un même PDU. Une fois cette borne atteinte, on supprime le PDU courant et on passe au prochain dans la file.

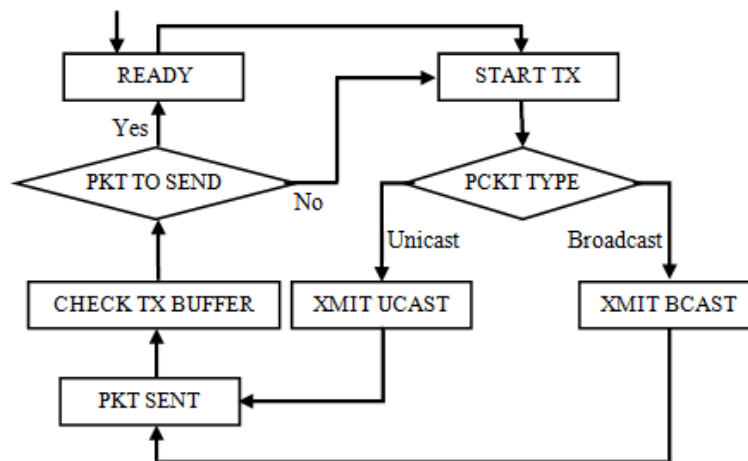


FIGURE 4.7 – Diagramme de transition pour UnSlotted ALOHA.

#### 4.5.2.2 Slotted ALOHA

Dans Slotted ALOHA, le support est divisé en tranches sans structure de super-trame, et un émetteur ne peut transmettre qu'au début d'une tranche. L'idée est de faire

en sorte qu'une même trame n'entre pas partiellement en collision avec plusieurs autres trames comme dans le protocole UnSlotted ALOHA.

Dans cette méthode, chaque station émet périodiquement sur un slot en utilisant son code d'accès. Un slot est constitué d'un certain nombre de bits donc de trames, l'émetteur envoie un bit sur chaque trame du slot en fonction de son code. Comme on peut le constater, divers paramètres peuvent influencer sur le comportement de cette méthode : la taille des slots, l'intervalle entre les slots, leur technique de gestion etc. Si à l'arrivée du prochain slot, le PDU émis n'est toujours pas acquitté, il est retransmis. Le délai de retransmission est donc égal à la taille du PDU moins la durée du slot dans ce cas. Comme dans la méthode précédente, une borne maximale de retransmission est fixée et les accusés sont prioritaires par rapport aux autres types de PDUs. Dans la présente méthode, l'émission n'étant pas immédiate, il devient nécessaire d'introduire deux états d'attente qui représentent l'état de la couche MAC avant l'arrivée du prochain slot ( voir la figure 4.8) : attente de l'apparition du slot puis attente du premier chip à utiliser.

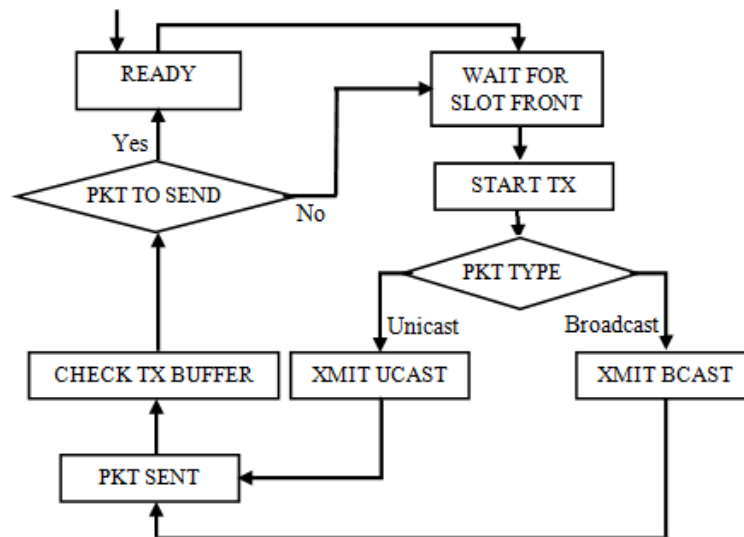


FIGURE 4.8 – Diagramme de transition pour Slotted ALOHA.

### 4.5.3 Les performances d'ALOHA

Dans UnSlotted ALOHA, pour qu'il n'y ait pas de possibilité de collision, il ne faut qu'aucune trame ne soit émise par un capteur à proximité pendant une durée égale à  $2t$  dite période de vulnérabilité (voir figure 4.9), où  $t$  la durée d'une trame. En prenant  $G$  le nombre moyen de trames émises par durée de trames et si l'on suppose que le nombre des trames émises pendant la durée d'émission d'une trame obéit à la loi de Poisson, alors la probabilité que  $k$  trames soient émises pendant la durée d'une trame est égale à :

$$P(k) = \frac{G^k * e^{-G}}{k!} \quad (4.1)$$

aussi la probabilité d'avoir 0 trame est de la forme  $e^{-G}$ .

Dans un intervalle de durée égale à 2 "durées de trame", le nombre moyen de trames générées est égal à  $2G$ . La probabilité qu'aucun trafic supplémentaire ne soit généré pendant la totalité de cette période de vulnérabilité est donnée par  $P_0 = e^{-2G}$ .

En posant  $S = G * P_0$  nous obtenons :

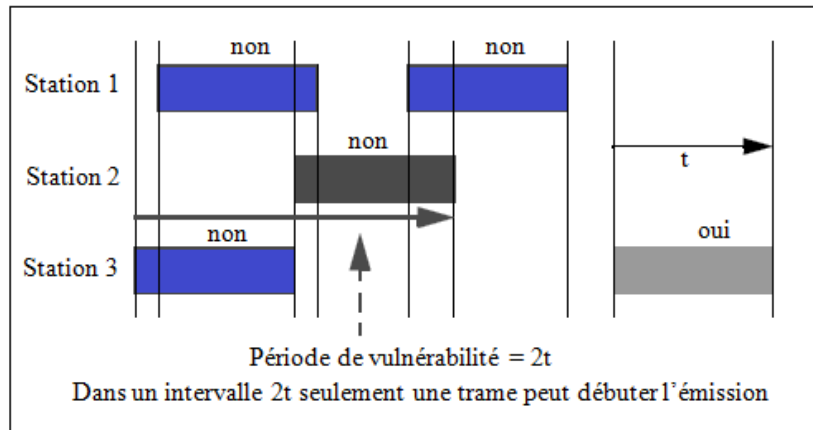


FIGURE 4.9 – Période de vulnérabilité dans UnSlotted ALOHA.

$$S = G * e^{-2G} \quad (4.2)$$

Le trafic maximum est obtenu pour  $G = 0.5$  avec  $S_{max} = 1/(2e)$  dont la valeur environ 0.184(18%). L'introduction des intervalles répétitifs de durée constante permet de doubler la capacité de transmission  $S_{max} = 1/e$ . Comme on peut le voir sur la figure 4.11, Slotted ALOHA présente un maximum pour  $G = 1$ , avec un trafic écoulé de  $S_{max} = 1/e$  dont la valeur environ 0.368(36.8%).

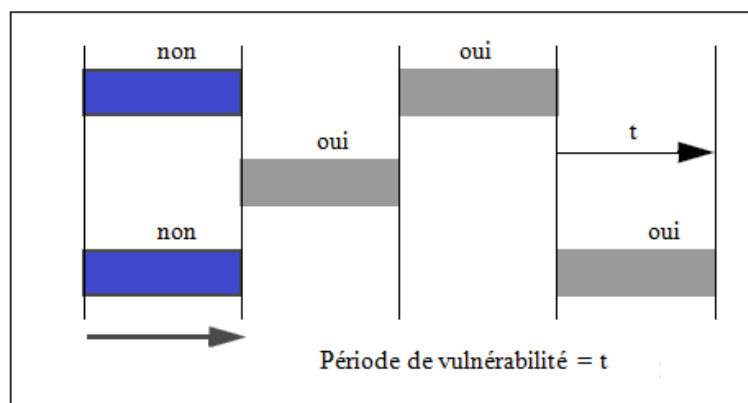


FIGURE 4.10 – Période de vulnérabilité dans Slotted ALOHA.

Dans cette méthode, qui est devenue le slotted ALOHA [136] ou ALOHA discrétisée, une station doit attendre le début d'un intervalle de temps pour commencer à émettre. comme le montre la figure 4.10, la période de vulnérabilité est limitée à la durée d'une trame ( $t$ ) ; ce qui nous conduit à :

$$S = G * e^{-G} \quad (4.3)$$

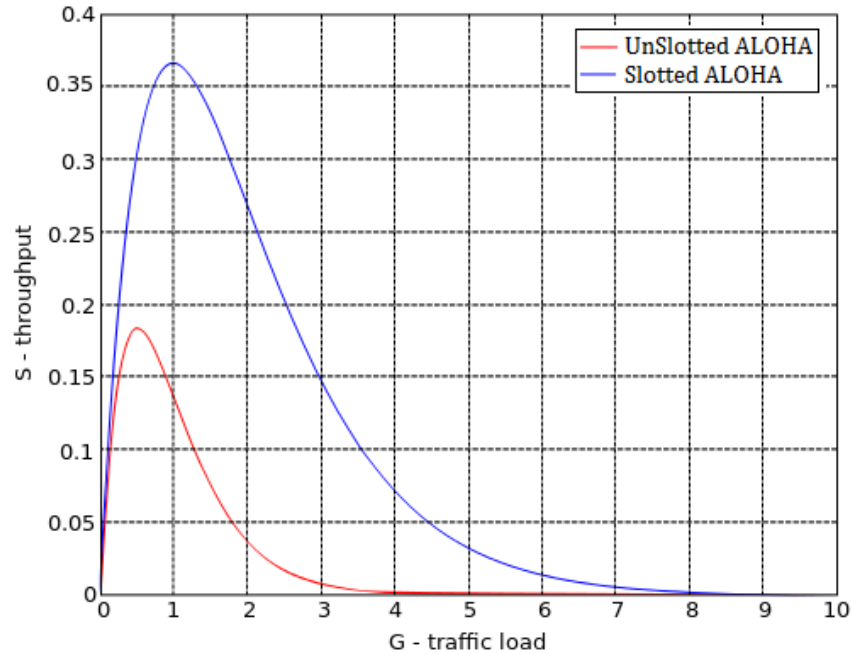


FIGURE 4.11 – Efficacité du protocole ALOHA.

## 4.6 Protocole WideMac

Nombreuses différences existent entre IR-UWB et la radio à bande étroite. La nature impulsionnelle de l'IR-UWB empêche l'écoute du canal. Ainsi, les techniques d'évitement de collision classiques ne sont pas pertinentes (c'est pourquoi la couche MAC de l'IEEE 802.15.4 a été adapté pour utiliser la méthode d'accès ALOHA au lieu de la méthode CSMA pour le standard IEEE 802.15.4a UWB). Son gain élevé en traitement facilite l'accès multiple simultané, et la consommation de puissance de la radio est beaucoup plus élevée dans la réception qu'en transmission [137]. Ces caractéristiques particulières font de la conception d'un nouveau protocole MAC une tâche qui mérite d'être enquêtée. La sous-section 4.6.1 présente les principales idées derrière la conception du protocole WideMac, tandis que la sous-section 4.6.2 définit son mode de fonctionnement et présente ses principaux paramètres. La sous-section 4.6.3 quant à elle met l'accent sur l'algorithme de backoff utilisé.

### 4.6.1 Logique de conception de WideMac

La première chose à décider lors de l'investigation d'un nouveau protocole MAC est de savoir si l'accès au support doit être déterminé par un algorithme d'ordonnancement (*scheduling algorithm*) ou par un algorithme de résolution de conflit (*contention resolution algorithm*). Un des avantages revendiqués dans les protocoles à base d'ordonnancement dans les applications avec une ultra basse consommation énergétique, c'est qu'ils n'ont pas besoin d'acquiescement car ils garantissent un accès sans risque de collision au support de transmission. Cependant, la nature dynamique et ouverte du canal sans fil rend à notre avis l'acquiescement obligatoire. Si une perte de paquets n'est pas détectée au niveau de cette couche, la couche supérieure devra le faire.

Une telle redistribution des tâches entre les différentes couches du protocole ne semble pas être la meilleure façon d’optimiser la performance globale du système. Un autre avantage des protocoles à base d’ordonnance est l’utilisation potentielle de la bande passante disponible. Cela semble être un point fort. En effet, les protocoles à accès aléatoire généralement réalisent seulement une fraction de la bande passante physique. Toutefois, ce raisonnement suppose un canal sans interférences, un trafic lisse et prévisible et pas de problème de coexistence. Ces deux aspects d’intégrité de la communication par acquittement et de robustesse aux interférences et l’extensibilité avec les réseaux coexistant sont les principales raisons qui ont amené à adopter l’approche à accès aléatoire pour WideMac.

Tous les protocoles avec accès à base d’ordonnancement souffrent d’une surcharge de signalisation qui augmente la consommation d’énergie de base. Ils manquent d’extensibilité lorsque l’on considère la taille, la densité du réseau et la capacité d’adaptation à un trafic réseau à faible débit de données. En outre, le problème de la synchronisation de la répartition intégrale n’est pas facile à résoudre, en particulier lorsque l’on considère tous les effets physiques qui peuvent être impliqués. Comme ça, un protocole MAC robuste et à faible puissance à base d’IR-UWB devrait :

- utiliser l’accès aléatoire pour faire face aux brouilleurs et de traiter les questions de coexistence,
- profiter du gain de traitement élevée de l’UWB,
- exploiter le faible coût énergétique de transmissions par rapport aux émissions,
- utiliser des accusés de réception pour garantir l’intégrité des communications dans toutes les circonstances,
- partager l’accès au canal de transmission entre les nœuds de façon équitable,
- utiliser efficacement les ressources d’énergie et de la bande passante.

#### 4.6.2 Description de WideMac

Le protocole WideMac présenté en [138; 139; 140] est une proposition d’un protocole MAC destinée à IR-UWB qui essaye de profiter de la faible consommation d’énergie ainsi que de la robustesse de IR-UWB à l’interférence multi-utilisateur. Il permet à tous les nœuds de se réveiller périodiquement (période  $T_W$ , identique pour tous les nœuds) et de façon asynchrone, de transmettre un message balise (Beacon) annonçant la disponibilité et d’écouter pendant une courte période  $T_{Listen}$  les tentatives de transmission.

La figure 4.12 illustre l’émission d’un seul message balise. Il commence par un préambule de synchronisation connu et détectable (de couleur gris) et est suivi d’une séquence de données (de couleur blanche) qui annonce l’adresse du nœud et potentiellement d’autres informations comme la liste de nœuds voisins ou des informations sur la table de routage (par exemple, le coût estimé du chemin vers le nœud collecteur). Un petit temps d’écoute suit  $T_{Listen}$ , au cours duquel le nœud reste en mode de réception et lui permet de recevoir un message selon les transmissions des nœuds voisins. En suite ce nœud passe en mode d’endormissement durant un temps  $T_{Sleep}$ .

Quand un nœud a un message à transmettre, il écoute le canal jusqu’à ce qu’il reçoive le message balise du nœud destination. Ce message balise contient une valeur de l’exposant backoff qui doit être utilisé par tous les nœuds lors d’une tentative d’accès à

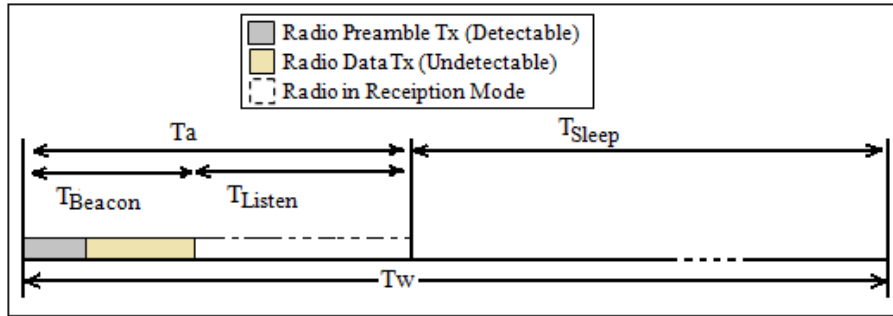


FIGURE 4.12 – Émission d'une balise du protocole WideMac.

cette destination. Si cette valeur est égale à zéro, le nœud source peut transmettre immédiatement, comme le montre la figure 4.13. Autrement, il attend un temps de backoff aléatoire, attend la balise de destination, et transmet son paquet de données. En raison de la non-fiabilité du canal sans fil, les paquets sont acquittés. Si un paquet n'est pas acquitté ou si la balise de destination n'a pas été reçue, une procédure de retransmission en utilisant l'algorithme backoff est déclenché jusqu'à ce que le nombre maximal de retransmissions  $maxTxAttempts$  est atteint. Les détails de l'algorithme backoff sont décrits dans la sous-section 4.6.3.

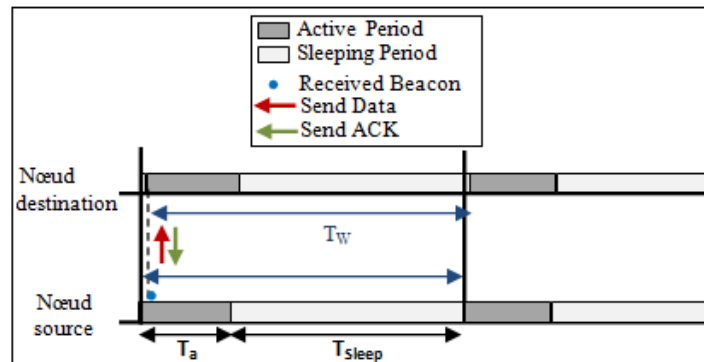


FIGURE 4.13 – Fonctionnement normale de WideMac.

La figure 4.14 schématise le fonctionnement du protocole avec 3 nœuds. Un nœud émetteur écoute le canal, il ignore les messages balise des nœuds autres que le destinataire. Après réception de la balise de ce dernier, il lui envoie un message. L'échange se termine avec un message d'acquiescement transmis par le nœud récepteur, et adressé au nœud émetteur. Une fois qu'un nœud reçoit la balise d'un nœud voisin, il peut prédire le temps des prochaines émissions des balises de ce nœud, car il connaît la période commune des balises. Cela contribue à réduire la consommation d'énergie car ce nœud peut passer en mode de sommeil en attendant l'instant du prochain réveil. Malheureusement, l'exactitude de cette information diminue avec le temps en raison de l'imprécision du quartz  $\Theta$ . Car, après un temps  $l$ , le nœud doit écouter durant une période  $4\Theta l$  pour plus de détails) et quand  $4\Theta l > T_W$  l'information n'est plus utile car elle devient trop vieux. Cette procédure est similaire à la réduction du préambule de réveil effectuée dans le protocole WiseMAC [141], avec la différence qu'ici le nœud source est à l'écoute au lieu de transmettre et l'information de synchronisation est acquise par la balise plutôt que par l'accusé

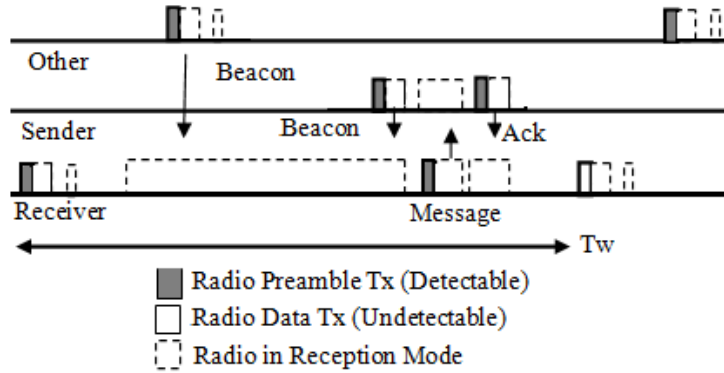


FIGURE 4.14 – Illustration du fonctionnement de WideMac telle que décrite dans [139]

de réception.

Écouter le canal lors d'une période de balise permet la découverte rapide et simple de voisins. Cette découverte est très utile pour les protocoles de routage distribués, et elle permet aussi l'évitement de collision des messages balise. En plus, si elle est effectuée régulièrement, elle permettra un apprentissage relatif du décalage d'horloge (une méthode qui réduit la valeur de  $\Theta$  apparente de l'ordre de  $1ppm$ ). En conservant les nœuds dans le mode de sommeil la plupart du temps, WideMac par conséquent économise de l'énergie.

L'émission de la balise permet de pallier au manque de capacité de détection de porteuse. Et laisse aussi les candidats expéditeurs savoir quand un nœud destination est disponible. Malgré une légère augmentation de la consommation d'énergie due au transmissions des balises, elle permet aussi la découverte rapide de voisins. Cela réduit la surcharge de trafic de signalisation dans la couche de routage et peut réduire globalement la consommation d'énergie totale du système.

### 4.6.3 Algorithme de backoff de WideMac

L'algorithme de backoff a un effet majeur sur l'évitement des collisions, la latence, ainsi que l'équité dans l'accès au canal. Les balises périodiques de WideMac permettent aux nœuds expéditeurs d'obtenir des informations sur l'état du canal au niveau du nœud destination. Ceci peut être utilisé pour réduire les problèmes des terminaux cachés et exposés.

La procédure de transmission de WideMac fonctionne comme suit : un nœud émetteur candidat attend la balise du nœud récepteur. Une fois qu'il le reçoit, il peut soit tenter immédiatement la transmission (par défaut pour les réseaux à faible charge) ou il peut déclencher un temporisateur de backoff avant l'envoi (cette option est activée par un drapeau *alwaysBackoff* dans la balise). Dans les deux cas, le nœud émetteur attend un accusé de réception. S'il n'arrive pas, une procédure de retransmission commence. Le nœud expéditeur choisit un temps aléatoire  $T_{Backoff}$  paramétré par l'Exposant Backoff ( $BE$ ) du nœud récepteur qui a été diffusé dans la balise en utilisant un backoff exponentiel binaire :

$$T_{Backoff} = N_{Backoff} \cdot T_W, \text{ avec } N_{Backoff} \in [0, 2^{BE_{Receiver}} - 1] \quad (4.4)$$

La durée de temporisation est donc une fonction de l'intervalle de réveil  $T_W$  et de

l'état du canal au niveau du nœud récepteur, comme capturé par  $BE_{Receiver}$ . Un tel paramétrage backoff à base du nœud récepteur a également été proposé dans RI-MAC [142]. L'utilisation d'une durée de backoff discrétisé à base de  $T_W$  est naturelle puisque tous les nœuds émetteurs candidats sont synchronisés avec l'instant de réveil du nœud récepteur : l'utilisation d'une partie de  $T_W$  ne changerait rien tant que le nœud ne transmettrait pas avant la réception de la balise du nœud destination. L'utilisation d'un entier multiple de la durée  $T_W$  pour l'unité backoff augmenterait la latence et la propagation du trafic, mais ceci peut également être réalisé en adaptant la valeur des  $BE_{Receiver}$  à l'état du trafic. La valeur  $BE_{Receiver}$  devrait refléter la congestion actuelle à un nœud. Plusieurs algorithmes existent :

- L'algorithme de backoff exponentiel binaire de CSMA (BEB) qui mène à des variations rapides de l'exposant backoff. Sa valeur double à chaque tentative infructueuse d'émission et est réinitialisé à son minimum pour chaque nouveau paquet à transmettre ;
- Augmentation multiplicative et diminution linéaire de MACAW (MILD), qui multiplie la fenêtre backoff par une constante pour l'augmenter et soustrait une autre constante de la fenêtre backoff pour la diminuer. Elle conduisant à des variations plus douces ;
- Utiliser une distribution Sift comme dans Crankshaft [143], qui a été montré être optimal dans la réduction de la collision lorsque la taille du réseau est connu. Mais elle nécessite une détection de porteuse ;
- Adapter l'algorithme BEB afin que l'exposant backoff est doublée à chaque autre échec de transmission. Ceci conduit à des valeurs plus stables comme proposé par Medwin dans le groupe de travail de l'IEEE 802.15.6 sur les réseaux corporels médicaux [144].

Dans RI-MAC, les auteurs ont choisi d'utiliser l'algorithme BEB. Cependant, avec la norme IEEE 802.15.4a il est plus difficile pour le nœud destinataire de détecter les collisions. Ainsi, nous adoptons une combinaison de RI-MAC de MACAW et les approches de Medwin : la valeur initiale de l'exposant backoff pour la transmission est tirée de la balise de destination. En cas d'échec de transmission (c'est à dire un accusé de réception manquant), c'est le nœud source qui augmente son exposant backoff. Il adopte la stratégie de Medwin qui le double à tout autre échec afin de minimiser la latence. L'exposant backoff du nœud (que nous appelons BE local, ou  $BE_{local}$ ) est initialement fixé à une valeur  $BE_{min}$  minimale qui peut être égale à zéro. Comme dans la proposition de Medwin,  $BE_{local}$  est doublé à tout autre échec de réception (exemple : la radio est synchronisé sur une trame mais ne parvient pas la décoder (checksum invalide)). Et à la réception réussie de chaque trame,  $BE_{local}$  est diminué de 1. Ainsi, l'exposant backoff locale évolue de façon similaire à la stratégie MILD de MACAW.

#### 4.7 Analyse analytique de la consommation d'énergie

Les protocoles MAC sans fil récents à ultra faible consommation énergétique ont tendance à être complexes. Et tandis qu'ils peuvent être décrits en quelques phrases, leurs performances peuvent être fortement influencées par plusieurs facteurs. Nous citons : les

choix mis en œuvre en temps de conception, les valeurs des paramètres, les configurations de la topologie et du trafic, etc.

Afin de réduire l'effort d'implémentation de nouveaux protocoles, Les protocoles disponibles sur les plates-formes matérielles ont utilisé souvent les implémentations publiques disponibles sur le framework TinyOS de la programmation des réseaux de capteurs. Et si les comparaisons analytiques font simplifier ou restreindre des hypothèses, notamment à la couche physique, ils peuvent inclure davantage protocoles. Cela les rend appropriés pour une première évaluation comparative avant la mise en œuvre dans un simulateur de réseaux ou dans un réseau de capteur réel. Dans cette section nous présentons des modèles d'analyse de la consommation d'énergie pour les deux protocoles WideMac et ALOHA avec ses deux variantes slottée et non slottée. Les protocoles sont supposés fonctionner dans un scénario Stocker & Acheminer, comme illustré dans la figure 4.15.



FIGURE 4.15 – Trafic à base de "Stocker & Acheminer" : le nœud 2 reçoit un paquet du nœud 1, le stocke puis l'achemine au nœud 3.

#### 4.7.1 Objectifs des modèles et hypothèses

Cette section met l'accent sur la fonctionnalité stocker & acheminer simple, typique d'un nœud de capteur dans un réseau faiblement peuplée et qui fait partie d'un arbre de routage. Les modèles développés dans les paragraphes après font tous les quatre hypothèses suivantes :

1. *Connectivité complète* : le réseau est composé de  $N$  dispositifs avec une connectivité complète. Cela permet d'exclure la problématique de routage et considérer la surécoute.
2. *Trafic à base de stocker/acheminer* : chaque nœud reçoit périodiquement un paquet et le transmet à un autre nœud. Le taux d'arrivée des paquets est une distribution de Poisson de paramètre  $\lambda$  :

$$P[NbArrivals = k] = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad (4.5)$$

Par conséquent, le temps moyen entre deux arrivées de paquets (de la même source) est  $\lambda^{-1} = L$ . Les destinations des paquets sont choisies dans le réseau afin que chaque nœud reçoive des données autant qu'il transmet, et les destinations ne changent pas pendant le fonctionnement du réseau.

3. *La radio est l'utilisateur dominant d'énergie* : tandis que le traitement MAC nécessite peu d'énergie à partir du micro contrôleur, nous supposons qu'il est négligeable par rapport à la consommation d'énergie de la radio. On peut donc estimer la consommation d'énergie du sous-système de communication en calculant le temps que la radio passe dans chacun de ses modes.

4. *Automate détaillée de la radio* : puisque la consommation de puissance est dérivée du temps passé dans chacun des modes radio, il est important de les modéliser avec précision. Nous utilisons l'automate à états finis illustré à la figure 4.16. Il est composé de trois états stationnaires, *Sleep*, *Rx* et *Tx*, et quatre états transitoires *SetupRx*, *SetupTx*, *SwitchRxTx* et *SwitchTxRx*. La radio peut toujours quitter tout état (permanent ou transitoire) et passer immédiatement en mode sommeil. Le temps passé dans un état transitoire est  $T_{TrState}$ , la consommation électrique dans chaque état est  $P_{State}$  et le coût de l'énergie d'une transition d'un état stable à un autre est  $E_{TrState}$ . Les valeurs utilisées pour l'évaluation dans la section suivante ont été prises à partir de [145] et [137]. Les paramètres d'énergie et de synchronisation de l'automate de la radio sont regroupés dans les tableaux 4.1 et 4.2.
5. *Radio à base de paquet* : la radio ne déclenche pas des demandes d'interruption au micro contrôleur à chaque réception. Au lieu de cela, il reçoit la trame entière, par la suite applique des codes de correction d'erreur, puis le délivre au micro contrôleur.

Certains modèles de protocoles font les hypothèses supplémentaires suivantes relatives à la synchronisation et la modulation :

1. *Une dérive d'horloge* : comme chaque nœud utilise sa propre source de temps, à base d'un cristal de quartz, des variations inévitables entre les nœud vont avoir lieu. Cela peut influencer le fonctionnement du protocole de communication. La précision de quartz  $\theta$  est donnée en parties par million (*ppm*), et un quartz typique possède une précision de  $30ppm$ . Cet effet est pris en compte pour les protocoles d'accès aléatoire.
2. *Synchronisation de l'ensemble du réseau* : Les protocoles TDMA supposent qu'ils peuvent maintenir une synchronisation précise à l'échelle du réseau. Nous supposons dans cette section que cette hypothèse est valable.
3. *Mode CCA* : certains protocoles à faible puissance d'écoute dépendent du principe écouter-avant-parler (LBT : *Listen Before Talk*). Pour que nous puissions comparer ces derniers, nous supposons qu'un mode optionnel a été utilisé dans ce cas pour permettre leur fonctionnement. Ce mode entrelace des séquences de préambule de synchronisation détectables avec des séquences de données non détectables. cela est fait afin d'augmenter la longueur de la trame de sorte qu'elle peut être détectée. À notre connaissance, aucun radio capable de détecter ces trames n'a été réalisé. Mais, nous avons inclus ces protocoles ici par souci d'exhaustivité, même si nous ne prévoyons pas qu'ils travailleront sur les systèmes futurs IR-UWB.

#### 4.7.2 Modèles de consommation d'énergie

En utilisant les modèles théoriques préalablement définis de la radio et du trafic réseau, la consommation d'énergie moyenne d'un protocole peut être évaluée par le calcul du temps moyen passé dans chaque état de la radio.

Durant chaque intervalle de réveil  $T_W$  de WideMac, un nœud doit entrer en mode de transmission (coût  $E_{SetupTx}$ ), transmettre sa balise (de coût  $T_{Beacon}P_{Tx}$ ), passer en mode réception (coût  $E_{SwRxTx}$ ) et tenter une réception de paquet (coût  $T_{Listen}P_{Rx}$ ). Ces

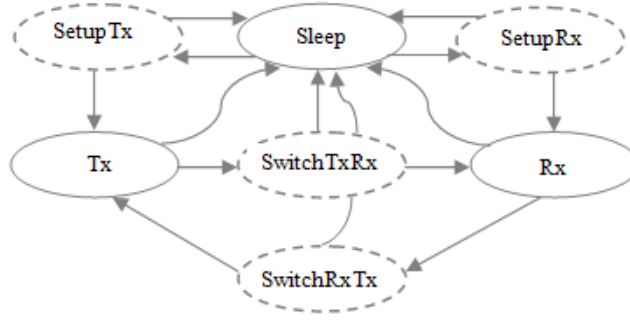


FIGURE 4.16 – Modèle détaillé de la radio comprenant des états transitoires.

TABLE 4.1 – Paramètres de la radio en consommation d'énergie.

Paramètre	valeur(mW)
$P_{Rx}$	36.4
$P_{Tx}$	1.212
$P_{Sleep}$	0.12
$P_{SetupRx}$	36.4
$P_{SetupTx}$	1.212
$P_{SwTxRx}$	36.4
$P_{SwRxTx}$	36.40

TABLE 4.2 – Paramètres de la radio en temporisation.

Paramètre	valeur
$T_{SetupRx}$	0.103 ms
$T_{SetupTx}$	0.203 ms
$T_{SwTxRx}$	0.120 ms
$T_{SwRxTx}$	0.210 ms
$T_{RxToSleep}$	0.031 ms
$T_{TxToSleep}$	0.032 ms
<i>Bitrate</i>	0.85 Mbps

coûts sont regroupés dans l'énergie de la balise  $E_{Beacon}$ . En outre, il doit parfois (en moyenne  $T_W/L$  fois par intervalle de réveil) transmettre un paquet ( $E_{Trans}$ ) ou recevoir un ( $E_{Recv}$ ), et dormir le reste du temps ( $E_{Sleep}$ ), donnant la consommation d'énergie moyenne suivante :

$$P^{WideMac} = \frac{1}{T_W} (E_{Beacon} + E_{Trans} + E_{Recv} + E_{Sleep}) \quad (4.6)$$

Avec :

$$E_{Beacon} = E_{SetupTx} + T_{Beacon}P_{Tx} + E_{SwTxRx} + T_{Listen}P_{Rx} \quad (4.7)$$

$$E_{Trans} = \frac{T_W}{L} [E_{SetupRx} + T_{BD}P_{Rx} + E_{SwRxTx} + T_{Packet}P_{Tx} + E_{SwTxRx} + T_{Ack}P_{Rx}] \quad (4.8)$$

$$E_{Recv} = \frac{T_W}{L} [(T_{Packet} - T_{Listen})P_{Rx} + E_{SwRxTx} + T_{Ack}P_{Tx}] \quad (4.9)$$

$$E_{Sleep} = [T_W - (T_{SetupTx} + T_{Beacon} + T_{SwTxRx} + T_{Listen} + \frac{T_W}{L}(T_{SetupRx} + T_{BD} + 2T_{SwRxTx} + 2T_{Packet} - T_{Listen} + T_{SwTxRx} + 2T_{Ack}))]P_{Sleep} \quad (4.10)$$

$E_{Trans}$  est l'énergie moyenne nécessaire pour retransmettre les paquets reçus. Pour transférer un paquet, le nœud doit d'abord entrer en mode réception (coût  $E_{SetupRx}$ ), écouter la balise de destination pendant un temps  $T_{BD}$  (de coût  $T_{BD}P_{Rx}$ ), passer en mode de transmission (coût  $E_{SwRxTx}$ ), envoyer le paquet (coût  $T_{Packet}P_{Tx}$ ), revenir en mode réception (coût  $E_{SwTxRx}$ ) et de recevoir l'acquittement ( $T_{Ack}P_{Rx}$ ). Le temps moyen de détection d'une balise est donné par une somme pondérée, sur toutes les valeurs possibles du temps  $L$  entre deux paquets (répartis comme une variable aléatoire exponentielle), de la durée nécessaire pour recevoir une balise. Ce temps est majoré par  $T_W$  puisque c'est le temps entre deux balises. C'est également une fonction du temps  $L$  lorsque le dernier paquet a été envoyé à la destination, et de la dérive de l'horloge  $\theta$  (s'il n'y a pas de dérive d'horloge, ou si la synchronisation est parfaite,  $\theta = 0$  et  $T_{BD}$  égal à zéro puisque le prochain instant d'émission de la balise peut être prédit avec une précision infinie) :

$$T_{BD} = \int_0^{+\infty} \min(4\theta l, T_W) \frac{1}{L} e^{-l/L} dl = 4\theta L (1 - e^{-\frac{T_W}{4\theta L}}). \quad (4.11)$$

$E_{Recv}$  est l'énergie moyenne nécessaire pour recevoir les paquets après la transmission de la balise. Il se compose d'un terme  $(T_{Packet} - T_{Listen})P_{Rx}$  pour tenir compte des réceptions réels de paquets (réduit pour éviter de compter deux fois le temps  $T_{Listen}$  car il est déjà inclus dans  $E_{Beacon}$ ), et les termes  $E_{SwRxTx}$  et  $T_{Ack}P_{Tx}$  pour représenter respectivement l'énergie de commutation radio et la transmission d'acquittement.

Enfin, le temps moyen passé en mode de sommeil  $E_{Sleep}$  est obtenu en soustrayant le temps passé dans tous les autres états de la période de balise. Ce modèle fait l'hypothèse que l'intervalle de réveil  $T_W$  est suffisamment grand pour que nous puissions négliger les collisions de balises.

## 4.8 Évaluation des performances énergétiques

La faible consommation en énergie de la technologie IR-UWB a été présentée dans la section 3.5.2. C'est l'un des avantages les plus impactant sur l'introduction de cette nouvelle technologie dans le domaine des RCSFs. Dans cette section nous présenterons les résultats d'évaluation des performances des protocoles MAC pour les RCSFs à base d'IR-UWB. Ces résultats ont fait l'objet de la publication [146] où nous avons limité l'évaluation aux performances coté consommation d'énergie des deux protocoles WideMac et ALOHA. Aussi nous justifierons le choix des solutions utilisées pour la réalisation des simulations. Finalement, les résultats obtenus confirment les performances de WideMac coté consommation énergétique dans le domaine des RCSFs à base d'IR-UWB.

### 4.8.1 Simulateurs pour RCSFs

L'étude des performances des protocoles MAC sur des RCSFs réels à base d'IR-UWB est extrêmement couteux et difficile. Ceci nous a amené à opter pour des simulations afin de procéder à une évaluation crédible des performances. Une première étude sur

les simulateurs disponibles pour les RCSFs a révélé l'existence de plusieurs simulateurs capables d'effectuer des simulations répondant aux critères des RCSFs. Nous présentons dans cette partie quelques simulateurs pouvant répondre à ceux-ci.

#### 4.8.1.1 NS-2 et NS-3

Le simulateur NS (*Network Simulator*) est très riche en termes de protocoles implémentés. Sa deuxième version NS-2 [147] se compte parmi les simulateurs les plus utilisés dans le domaine des RCSFs. Son projet a débuté en 1989 avec le simulateur réseau REAL, il a connu plusieurs extensions via les contributions de la communauté scientifique. Il est aussi accompagné d'outils de visualisation graphique permettant d'observer graphiquement le comportement des objets durant la simulation. NS-2 se base sur deux langages de programmations distinctes :

- *C++* : il constitue la partie centrale du simulateur (le noyau) et qui définit tout le mécanisme interne des objets de simulation ;
- *OTCL (Object-oriented Tool Command Language)* : il met en place la simulation par l'assemblage et la configuration des objets ainsi que la planification des événements discrets.

NS-3 [148] est le successeur de NS-2. Son développement a commencé en 2006 et la première version stable est disponible depuis 2008. C'est aussi riche que sa précédente version en termes de protocoles et structures implémentées. L'architecture de NS-3 a été modifiée par rapport à celle de NS-2, et la rétro-compatibilité de NS-3 avec NS-2 n'est pas possible. Ainsi le double langage utilisé par NS-2 n'existe plus dans NS-3. Le langage OTcl a complètement disparu de son architecture. Avec NS-3 il est possible d'écrire du code dans d'autres langages de programmation, comme le Python ou le Perl, en utilisant des générateurs intégrés à NS-3 qui vont transcrire ce code en C++. Ce simulateur contient un système d'objets hiérarchiques, et un système intégré de production de résultat de simulation. Cette base est associée à un système de gestion de paquets efficace en terme de mémoire, ainsi que des algorithmes de simulation d'événements discrets qui gèrent la progression de chaque simulation.

#### 4.8.1.2 OPNET

OPNET [149] est un environnement graphique créé pour permettre de concevoir, étudier des réseaux numériques, et des protocoles de communication avec une grande flexibilité. C'est un outil de modélisation et de simulation de réseaux très puissant et très complet s'adressant à un public varié (chercheurs, entreprises, opérateurs, ...). Il permet également de simuler un bon nombre de matériel existant comme les routeurs, les serveurs d'application, etc... Grâce à cela, toutes les configurations de réseaux deviennent très faciles à modéliser et simuler.

OPNET utilise un modèle hiérarchique qui se base sur des frontières physiques et fonctionnelles décrivant d'une façon précise les topologies et les flux échangés dans un système de communication. Ce modèle hiérarchique présente trois niveaux de description. Pour chaque niveau, en plus de la large bibliothèque d'objets disponible pour l'utilisateur, de nouveaux objets peuvent aussi être créés. Le plus haut niveau de cette hiérarchie est le modèle réseau qui présente la topologie physique d'un réseau de communication. Le

deuxième niveau est un modèle de nœud défini à l'aide de blocs ou modules décrivant son fonctionnement tels que les modules émetteur ou récepteur sans fils. Le comportement et le fonctionnement de chaque module peuvent être décrits par un modèle de processus qui constitue alors le troisième niveau de la hiérarchie. À côté de tous ces caractéristiques, OPNET est caractérisé par son apprentissage long, et sa nature payante sauf pour sa version académique.

#### 4.8.1.3 OMNet++ et MiXiM

OMNet++ [150] est un simulateur à événements discrets orienté objet modulaire et extensible, basé sur le langage C++. Il a été conçu pour simuler les systèmes réseaux de communication, les systèmes multi-processeurs, et d'autres systèmes distribués. C'est un framework qui inclut également un outil de développement intégré et un environnement d'exécution graphique fournissant ainsi un cadre de simulation puissant et clair.

L'extension MiXiM [151] rejoint et prolonge plusieurs frameworks de simulation existants développés pour les simulations sans fil et mobiles dans OMNet++. Il fournit des modèles détaillés pour le canal sans fil, la connectivité sans fil, des modèles de mobilité, des modèles pour les obstacles et de nombreux protocoles de communication en particulier au niveau contrôle d'accès au support (MAC). En outre, il fournit une représentation graphique conviviale de réseaux sans fil et mobiles dans OMNet++. En plus il supporte le débogage et la définition de scénarios de simulation sans fil simples et même complexes. Il fournit ainsi une base solide pour la mise en œuvre des modèles détaillés de la couche PHY. Notamment, il dispose d'une implémentation des deux versions du standard IEEE 802.15.4a UWB et 802.15.4 DSSS. Les modèles de couches physiques fournis sont riches en détails.

Plusieurs classes MiXiM ont été réutilisées pour mettre en œuvre nos modèles de simulations. Ils sont décrits dans la figure 4.17 qui représente le diagramme UML de l'architecture de simulation. Les modules OMNet++ sont représentés dans la même figure par des cadres arrondis et les classes simples C++ sont représentés par des rectangles. La classe MiXiM *BasePhyLayer* a été choisie comme classe de base pour la classe *PhyLayerUWBIR*, et la classe *UWBIRMac* dérive de la classe *BaseMACLayer*. Les classes paramétrées sont configurées avec initialisation à partir du fichier texte «*omnet.ini*». La classe *PhyLayerUWBIR*, en particulier, instancie les modèles récepteur et de canal demandés. La classe *UWBIRMac* fournit, quant à elle, des fonctions utiles aux couches MAC à base d'IR-UWB. Une classe *IEEE802154A* contient toutes les fonctions spécifiques à cette norme et permet de générer un signal MiXiM modulant des bits définis soit par l'utilisateur ou aléatoirement.

### 4.8.2 Choix du simulateur

L'objectif de la simulation est de reproduire les mêmes résultats que ceux que l'on obtiendrait en conditions réelles. NS et OPNET semblaient au début des bons choix en raison de leurs réputations fortes comme simulateurs très puissants dans les réseaux classiques. Cependant, l'absence d'implémentations de la technologie IR-UWB était le problème majeur qui a poussé à écarter le choix de l'une des deux solutions. Finalement, nous avons

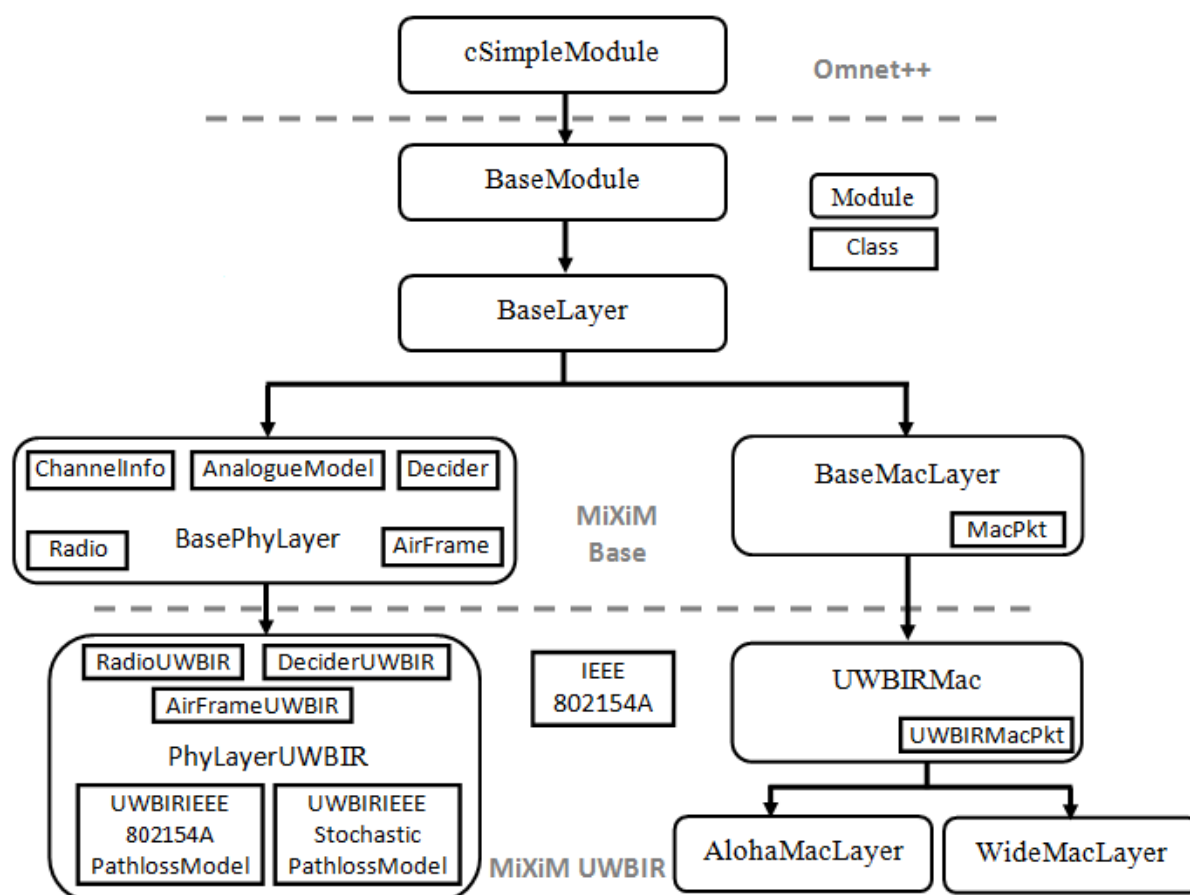


FIGURE 4.17 – Diagramme UML représentant les relations entre Omnet++, les classes MiXiM et MiXiM UWBIR.

opté pour le simulateur OMNet++. Ce choix était basé sur plusieurs points. D'une part, les avantages et les caractéristiques d'OMNet++ cités dans la section 4.8.1.3 qui l'a favorisé par rapport à NS-2. D'autre part, la distribution de l'extension MiXiM offrant une implémentation de la couche PHY du standard UWB IEEE802.15.4a. Ce dernier point était le point cruciale qui a conduit à l'adoption de la solution OMNet++/MiXiM.

### 4.8.3 Scénario de simulation

Les multiples simulations que nous avons fait tourner ont été réalisées avec la version 2.1 de l'outil MiXiM intégré à la version 4.2 du simulateur OMNet++. Nous avons utilisé un réseau en grille comme illustré dans la figure 4.18 représentant le scénario 25 nœuds. Dans ce scénario, les nœuds transmettent des paquets à un nœud collecteur situé dans un coin de la grille. Pour mesurer l'impacte du nombre de nœuds, nous avons fait tourner plusieurs simulations en changeant le nombre de nœuds du réseau.

Pour assurer la crédibilité des résultats obtenus, nous avons exécuté tous les scénarios de simulation 10 fois pour chacun. Puis, nous avons pris la moyenne des résultats produits pour obtenir le résultat final de chaque scénario.

Dans ces simulations, nous avons utilisé les paramètres pré-mentionnés dans les deux tableaux 4.1 et 4.2. Ils représentent respectivement, les paramètres de la consommation

énergétique de la radio et ceux de sa temporisation. Les paramètres de l'algorithme de backoff utilisés dans WideMac sont :  $minBE = 1$  et  $maxBE = 6$ , et sa période de réveil a été prise égale à  $T_W = 0.037s$ . La couche application, quant à elle, génère régulièrement des paquets de données de 512 octets à intervalle constant pris égal à  $2s$ .

Dans le projet MiXiM, nous avons bâtis l'architecture logicielle des nœuds sans fils selon les spécifications suivantes :

- La couche physique : la classe *PhyLayerUWBIR* disponible dans la version MiXiM-2.1.
- La couche MAC : nous avons développé notre propre package de la couches MAC comportant les classes des protocoles requis pour les simulations. Il regroupe les classes suivantes : *AlohaMacLayer* et *WideMacLayer*.

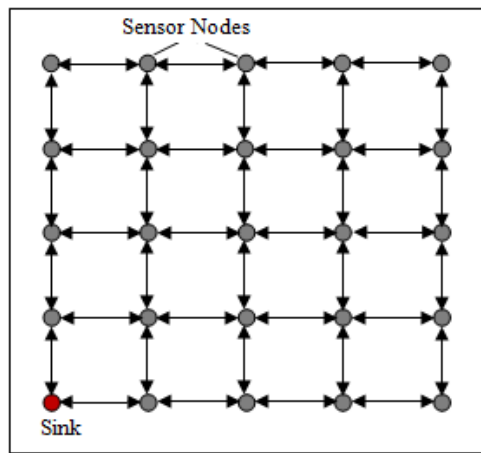


FIGURE 4.18 – Scénario de simulation de 25 nœuds.

#### 4.8.4 Résultats et analyse

Dans les RCSFs, la consommation d'énergie est le critère le plus important dans le choix des protocoles MAC à déployer sur un réseau, car il influençait directement sa durée de vie. La faible consommation d'énergie du protocole WideMac a été concrétisée par les résultats de la figure 4.19. En plus de la simplicité d'implémentation du protocole ALOHA, nous avons comparé WideMac avec ALOHA, en premier lieu, car ils utilisent la même méthode d'accès sans utilisation de la technique de détection de porteuse (no carrier sensing). Deuxièmement, vue l'ébauche de proposition du groupe de travail IEEE802.15.TG4a [145] qui a définit ALOHA comme méthode d'accès par contention pour IR-UWB.

La même figure 4.19 montre que la consommation d'énergie du protocole WideMac est remarquablement inférieure au protocole ALOHA. Et que la consommation par unité de temps varie entre  $99.925mW$  et  $99.28mW$  dans le cas du protocole ALOHA, et entre  $14.67mW$  et  $13.97mW$  pour le protocole WideMac. La performance remarquable de WideMac par rapport à ALOHA est héritée de sa méthode d'optimisation de consommation. Cette optimisation résulte du fait qu'il permute l'état de l'émetteur-récepteur radio périodiquement entre l'état d'endormissement et l'état actif, en favorisant l'état d'endormissement où la consommation énergétique est minimale. Contrairement au protocole

ALOHA, l'émetteur-récepteur radio du nœud capteur reste actif continuellement dans l'attente d'envoyer ou recevoir des paquets.

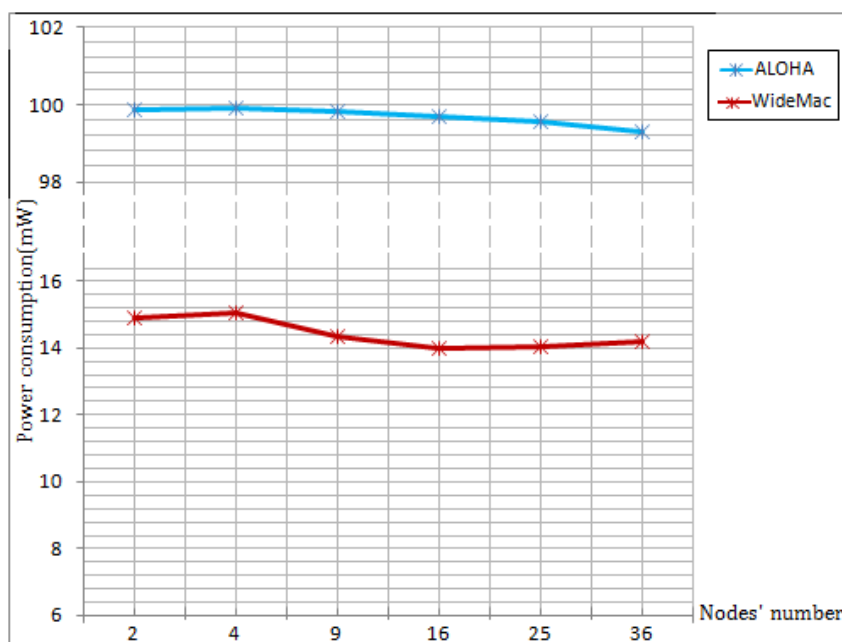


FIGURE 4.19 – L'énergie moyenne consommée par les nœuds.

Notant que la variation dans la consommation moyenne des nœuds du réseau varie très peu en fonction du nombre de nœuds, car la variation dans ce nombre affecte la densité du réseau. Cette densité provoque évidemment des collisions de paquets, qui engendrent donc des retransmissions qui sont gérées par un algorithme de backoff. Ce dernier utilise un exposant backoff binaire modifié qui double la fenêtre de contention lorsqu'une transmission échoue. Ce retard programmé dans la transmission, résulte en une petite minimisation de consommation, car le nœud en question entrera dans le mode d'endormissement en attendant la fenêtre d'envoi qui lui a été réservée.

## 4.9 Conclusion

Dans ce chapitre, après un état de l'art sur les protocoles MAC dédiés aux RCSFs à base d'IR-UWB, WideMac a été présenté comme un nouveau protocole MAC à très faible consommation énergétique et avec accès aléatoire asynchrone. Contrairement à la plupart des protocoles, WideMac ne dépend pas d'un mécanisme de détection de porteuse. Cette propriété clé le rend particulièrement adapté pour la technologie Radio Impulsionnelle Ultra Large Bande, qui fonctionne sans porteuse et dont les émissions sont difficiles à détecter [145].

Comme décrit dans ce chapitre, WideMac intègre plusieurs mécanismes utilisés dans les protocoles MAC sans fil récents. À savoir, les transmissions acquittées, les retransmissions automatiques, paramétrage du backoff selon l'état du récepteur. Ces mécanismes apportent des solutions à des problèmes bien connus comme les terminaux cachés, les terminaux exposés, les collisions et les interférences. Il atteint des niveaux de consommation d'énergie ultra-faible puisqu'il met périodiquement l'émetteur-récepteur radio en son

mode d'endormissement la majorité du temps. Il adopte une approche d'accès aléatoire asynchrone qui offre une grande robustesse aux interférences. Il présente ainsi une grande évolutivité avec le trafic et la taille du réseau, et permet une application simple aussi bien que la découverte rapide des voisins à l'aide des messages balises.

Avec tous ces avantages, WideMac reste un protocole MAC prometteur en termes de ces performances énergétique. Chose qui a été prouvé dans le présent chapitre. La synchronisation des périodes de réveil dans ce protocole reste un problème non abordé jusqu'à présent dans la littérature. Malheureusement, ce problème influence son rendement car il provoque le problème d'absence de communication entre certains nœuds. Le chapitre suivant adressera en détail ce problème et lui présentera des solutions, ainsi qu'une amélioration de son algorithme de backoff.

## 5.1 Introduction et motivation

Le protocole WideMac a été présenté comme un nouveau protocole de la couche MAC conçu pour les réseaux de capteurs sans fil à base d'émetteurs-récepteurs (transceivers) utilisant la technologie ultra-large bande radio impulsionnelle (IR-UWB). Ses performances en termes de consommation d'énergie ont été prouvées, et elles ont été très satisfaisantes. Cette satisfaction est due au fait que ce dernier conserve efficacement l'énergie des nœuds du réseau puisqu'il met périodiquement ces derniers en leur mode d'endormissement la majorité de temps par rapport à leurs périodes actives. L'avantage que présente donc ce protocole coté optimisation d'énergie nous a poussés à l'étudier en vue d'améliorer ces performances et son rendement.

Le chapitre précédent a présenté le protocole WideMac en détail. Et nous avons vu que les nœuds utilisant ce protocole s'activent régulièrement à chaque intervalle de réveil  $T_W$ . Ce dernier est constant et c'est une caractéristique de ce protocole. À chaque instant de réveil, chaque nœud envoie une balise indiquant ainsi que ce nœud transmetteur est prêt à recevoir des données ou tout simplement qu'il est actif. Un nœud désirant donc envoyer un paquet de donnée à un autre nœud, doit attendre la réception de la balise émise par ce dernier au moment de son activation ou son réveil. Cela implique simplement que le nœud transmetteur de donnée doit se réveiller après le nœud destination de cette donnée. Cette remarque nous a attirés l'attention. Elle veut dire qu'on ne peut pas avoir des périodes constantes de réveil pour tous les nœuds d'un réseau si nous voulons avoir des échanges d'information entre les nœuds dans tous les sens le long de notre réseau ou tout simplement il faudra prévoir un mécanisme de synchronisation de telle sorte que les communications peuvent se produire dans tous les sens.

Le présent chapitre présentera les problèmes de synchronisation rencontrés dans le protocole WideMac, ainsi que les solutions qui ont été incorporées pour y remédier. ensuite il présentera le protocole SWIMAC. Après, l'accent sera mis sur l'évaluation des performances de ce nouveau protocole sur des RCSFs à base d'IR-UWB. Finalement nous terminerons ce chapitre par une conclusion.

## 5.2 Problème de communication dans un seul sens

### 5.2.1 Présentation du problème

Cette section représente le travail publié dans [153] traitant le problème de communication dans un seul sens dans WideMac, ainsi que les solutions proposées. Ce problème a été observé après de nombreux tests réalisés sur le protocole WideMac dans différents contextes et avec des architectures utilisant un nœud collecteur (Sink). Avec ces tests, nous avons observé que des nœuds en un nombre non négligeable n'envoient aucun paquet au nœud collecteur. Ce fait a été prouvé par simulation comme le montre la figure 5.1. Elle présente les résultats de simulation obtenus pour un scénario faisant intervenir 24 nœuds en plus du nœud collecteur (Sink). La simulation a été réalisée avec la plateforme MiXiM sous OMNet++. Les nœuds du réseau simulé sont déployés sur une grille de  $5 * 5$  avec une couche application qui génère 80 paquets au nœud collecteur durant le temps de simulation. Nous constatons d'après Les résultats de cette figure que 6 nœuds sur 24 n'ont envoyé aucun paquet pour le nœud collecteur sur un nombre total égal à 80 paquets à envoyer comme il a été précisé dans les paramètres de simulation. Pour mieux investiguer ce problème et pour avoir plus de crédibilité dans la situation de ce problème, nous avons étudié le nombre de nœuds qui n'ont envoyé aucun paquet au nœud collecteur en variant le nombre de nœuds dans des scénarios de simulations similaires au précédent. La figure 5.2 représente les résultats obtenus. Elle montre que dans tous les scénarios, on trouve bien toujours des nœuds qui n'ont envoyé aucun paquet au nœud collecteur. Ces résultats montrent donc l'absence de communication entre un nombre non négligeable des nœuds du réseau et prouvent donc l'existence du problème de non synchronisation dans le protocole WideMac.

Partant de ce qui a été présenté précédemment, ces résultats étaient bien attendus. Simplement parce que dans le protocole WideMac nous ne trouvons aucune implémentation de la synchronisation entre les nœuds et plus précisément, entre leurs instants de réveil. Malheureusement, la négligence de problème provoque sûrement une diminution en termes de rendement et donc d'efficacité du protocole WideMac. La recherche donc d'une solution à ce problème de synchronisation s'est imposée.

Pour mieux exposer le problème précité, nous l'avons schématisé dans la figure 5.3. Elle montre clairement la cause du problème de communication dans un seul sens entre deux nœuds. Il survient à cause du décalage observé entre les périodes actives de ces derniers, et provoque ainsi l'impossibilité de communication du nœud A vers le nœud B. Conséquemment, le nœud A ne peut envoyer en aucun cas des données au nœud B puisqu'il ne peut pas recevoir sa balise ou beacon.

### 5.2.2 Résolution du problème

#### 5.2.2.1 Procédure normale de synchronisation

Pour pallier à ce problème nous avons proposé une solution qui repose sur l'exploitation de la balise que le nœud B reçoit du nœud A. Ce dernier qui veut envoyer des données au nœud B doit encapsuler dans sa balise une demande de synchronisation avec le nœud

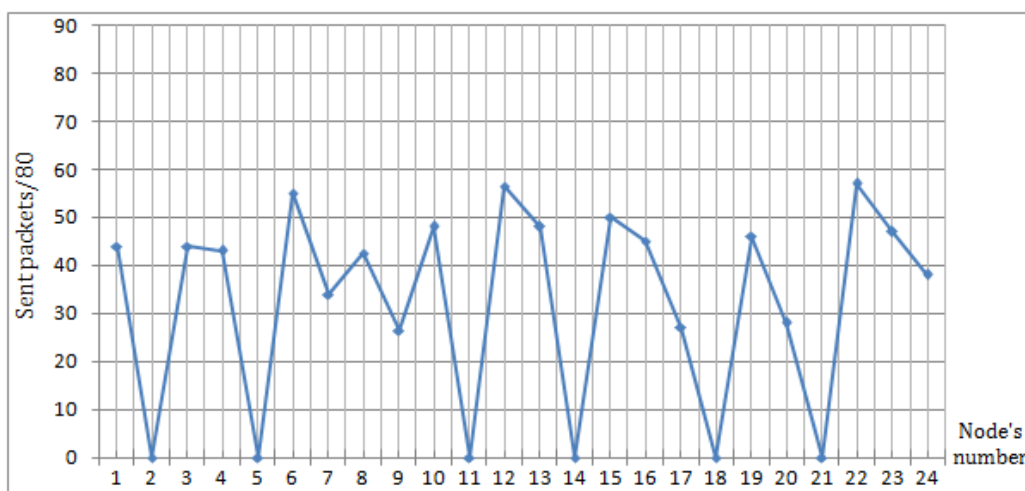


FIGURE 5.1 – Livraison de paquets pour le scénario 25 nœuds.

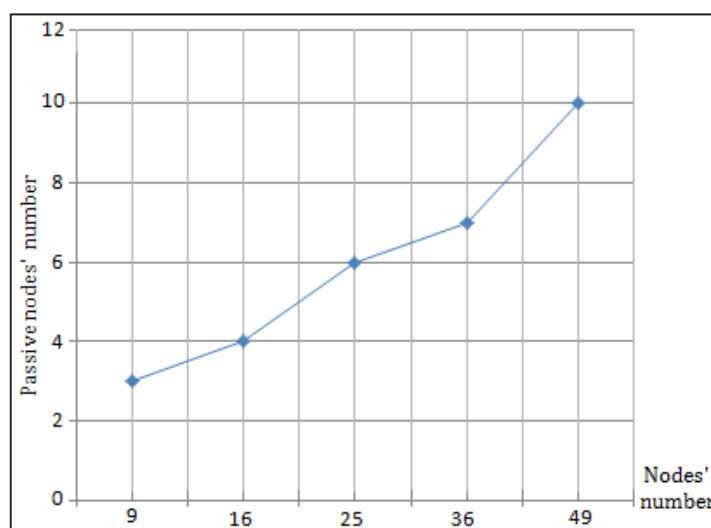


FIGURE 5.2 – Nombre de nœuds non communicants.

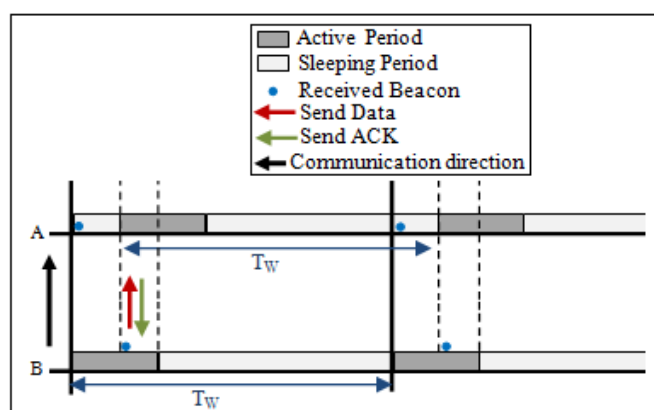


FIGURE 5.3 – Cas de communication dans un seul sens(de B vers A).

B. Une fois ce dernier recevra cette balise contenant une demande de synchronisation avec lui, et en fonction de l'instant de réception de cette balise, il lancera une procédure de

synchronisation avec le nœud A. cette procédure de synchronisation consiste simplement à calculer l'instant du prochain réveil de telle sorte que la période active du nœud B soit directement après la période active du nœud A avec un décalage acceptable. Comme ça et comme le montre la partie droite de la figure 5.4 la procédure consiste à ajouter un décalage temporel  $\Delta T$  à la période du sommeil du nœud B. Le nœud A, après cette procédure de synchronisation, peut recevoir la balise du nœud B et commencer donc à lui envoyer des paquets de données. A ce moment, nous disons que le nœud B s'est synchronisé avec le nœud A.

Pratiquement, lorsque le nœud destinataire reçoit la demande de synchronisation en-

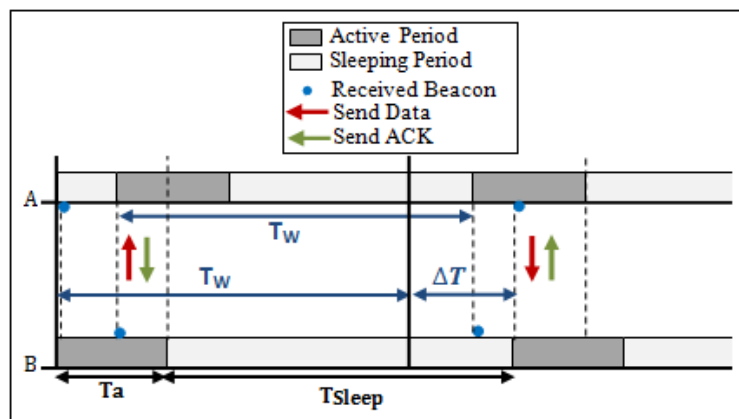


FIGURE 5.4 – Procédure normale de synchronisation.

capsulée dans la balise reçue, il lance une procédure de synchronisation en fonction de l'instant de réception de cette demande. L'opération se fait localement dans la nouvelle procédure *synchronizeWith()* dans laquelle il programme l'instant de son prochain réveil. Cet instant est donné par :  $t + T_W + \Delta T$  où  $t$  est le temps où le nœud courant a reçu le message balise.

### 5.2.2.2 Paramètres de synchronisation

Pour pouvoir gérer les demandes ainsi que les procédures de synchronisation, un nœud maintient en local les variables suivantes : *nbrSynchRetry*, *synchSrc* et *CW*. En plus, il utilise le paramètre *MSCW*. Aussi, nous avons changé la structure du message balise de telle sorte qu'il comportera les trois champs additionnels suivants : *SN*, *IS* et *RS*.

La première variable *nbrSynchRetry* compte le nombre de tentatives de synchronisation avec le nœud destinataire en cours. Elle est incrémentée par 1 lors de l'envoi d'une balise avec un indicateur *RS* mis à vrai. Et à la réussite de chaque opération de synchronisation, elle est remise à -1. La seconde variable *synchSrc* marque l'adresse MAC du dernier nœud auquel le nœud courant est synchronisé. Et la troisième variable *CW* (*Contention Window*) représente le numéro de la fenêtre de contention après l'opération de backoff, elle est décrémenté par 1 à chaque l'entrée de chaque nouvelle fenêtre  $T_W$  et à chaque opération de backoff.

Le paramètre *MSCW* (*Minimum Synchronizaton Contention Window*) représente le nombre minimale de fenêtres de contention pour demander la synchronisation.

Les nouveaux champs introduits dans les messages balises sont :

- SN : l'adresse du nœud synchronisé avec le nœud générateur de ce message balise. Il est utilisé lorsque le drapeau IS est mis à vrai.
- IS : un drapeau utilisé pour indiquer que le nœud transmettant ce message balise est synchronisé ou non avec le nœud SN.
- RS : un drapeau utilisé pour indiquer que le nœud transmettant ce message balise demande une synchronisation avec le nœud SN.

Notant que  $T_W$  est la période de réveil (temps de fenêtre) caractéristique de WideMac.  $T_a$  est la durée d'activité des nœuds durant laquelle ils sont en attente d'un message de donnée ou un message balise. Le paramètre *maxTxAttempts* représente le nombre maximal de retransmission des trames, et *macAckWaitDuration* paramètre le temps d'attente pour un accusé de réception après la transmission d'une trame unicast. *minBE* et *maxBE* sont respectivement la valeur minimale et maximale de l'exposant backoff utilisé dans l'algorithme de backoff.

Pour les paramètres précités, nous avons utilisé les valeurs mentionnées dans le tableau 5.1. Dans ce dernier nous n'avons pas précisé la valeur du paramètre  $T_a$  puisqu'il sera étudié avec plusieurs valeurs.

TABLE 5.1 – Paramètres de synchronisation de WideMac.

Paramètre	Valeur
$T_W$	0.037s
$T_a$	–
<i>MSCW</i>	7
<i>maxTxAttempts</i>	20
<i>macAckWaitDuration</i>	0.0003s
<i>minBE</i>	1
<i>maxBE</i>	6

### 5.2.3 Évaluation

Après l'implémentation de cette première procédure de synchronisation dénommée "Procédure normale de synchronisation", on constate une amélioration dans le rendement du protocole WideMac. La figure 5.5 représente les résultats obtenues dans le même scénario de simulation faisant intervenir 25 nœuds. Elle montre que tous les nœuds ont pu envoyé plus de 43 paquets sur un total de 80 paquets à envoyer. Et même, 6 nœuds sur 24 ont été capable d'envoyer plus que 80% de leurs paquets. Ainsi, le mécanisme de synchronisation implémenté a pu surmonté le problème de communication dans un seul sens pour les scénarios utilisés et avec les paramètres utilisés dans l'initialisation des instants de réveils des nœuds des réseaux simulés.

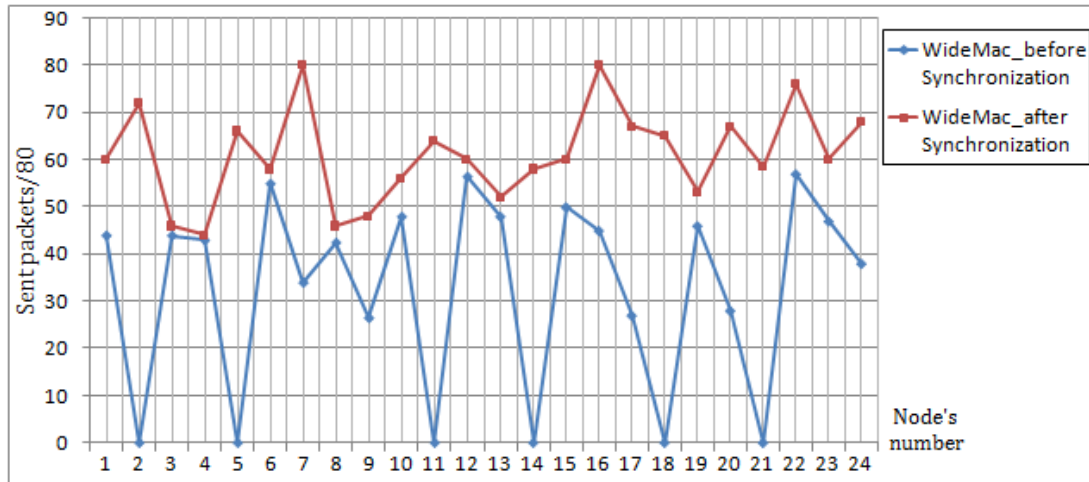


FIGURE 5.5 – Livraison de paquets pour le scénario 25 nœuds.

### 5.3 Problème d'absence total de communication entre deux nœuds

#### 5.3.1 Présentation du problème

Le problème de synchronisation résolu dans la section précédente est liée au cas où les périodes d'activité des nœuds communicants se chevauchent dans le temps comme il a été montré dans la figure 5.3. Le problème d'absence total de communication entre deux nœuds survient lorsqu'il n'y a aucune intersection entre les périodes actives des nœuds communicants. La figure 5.6 présente ce cas entre les deux nœuds A et B. Elle montre que le nœud A ne peut pas envoyer ses données au nœud B et vice versa. Cela est dû au fait qu'aucun des deux nœuds ne peut recevoir la balise de l'autre, simplement parce qu'il n'y a pas d'intersection entre leurs périodes actives. Même après l'application de la procédure normale de synchronisation, aucun des deux nœuds ne peut être synchronisé avec l'autre. Cela arrive puisque le nœud A n'arrivera jamais à recevoir la balise de demande de synchronisation du nœud B et vice versa. Alors, les deux nœuds risquent de rester dans cette situation de non communication si nous ne limitant pas le nombre de demandes de synchronisation qui doit être généré par le nœud transmetteur. ce Problème aussi bien que sa solution ont fait l'objet de la publication [154].

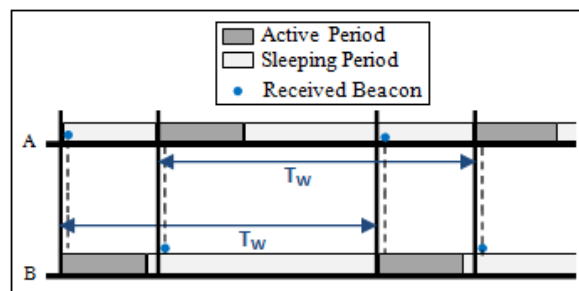


FIGURE 5.6 – Absence de communication dans les deux sens.

### 5.3.2 Résolution du problème

#### 5.3.2.1 Seconde procédure normale de synchronisation

Nous avons résolu ce problème par la limitation du nombre de demandes de synchronisation avec un nombre maximal  $MSR$  (*Max Synchronization Retries*). Avec le bon choix du nombre  $MSR$ , et une fois le nombre de demandes de synchronisation l'atteint, une nouvelle procédure pour tenter une synchronisation est lancée. La limitation des demandes de synchronisation générés dans la procédure *synchronizeWith()* est présentée dans l'algorithme 5.1. Dans cette procédure, si le nombre  $MSR$  est atteint, cela signifie que le nœud courant doit lancer une nouvelle tentative de synchronisation qui essaye de synchroniser les deux périodes actives des nœuds concernés. En d'autres termes, l'échec de la procédure normale de synchronisation après  $MSR$  demandes déclenche la deuxième procédure de synchronisation dénommée *performSynchronizationAttempt()*.

La figure 5.7 montre que le nœud source dans ce cas, planifiera l'instant de son prochain réveil à  $T_W - \beta$  à la place de l'instant normal  $T_W$ . Avec ce décalage  $\beta$ , les périodes actives des deux nœuds auront plus de chance de se croiser donnant lieu à une communication. La même figure montre ainsi l'exemple d'une seconde procédure réussie de synchronisation. En plus du décalage de l'instant de réveil, le nœud source remet à 0 son compteur de demandes de synchronisation *nbrSynchRetry*. Même si cette tentative

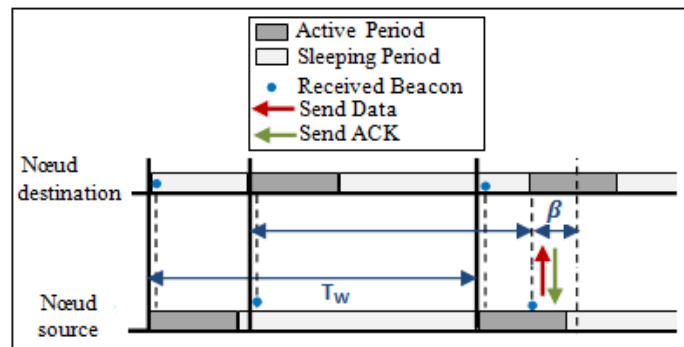


FIGURE 5.7 – Synchronisation dans le cas d'absence de communication dans les deux sens.

de synchronisation échoue la première fois, sa répétition va certainement aboutir à une situation de communication entre les deux nœuds. Étant donné que la première procédure échoue toujours dans la situation de non communication, par suite, la seconde procédure de synchronisation est répétée tant que les nœuds sont dans la situation de non communication. Cette répétition aboutira même si le mécanisme de synchronisation proposé échoue la première fois.

#### 5.3.2.2 Paramètres additionnels de synchronisation

$MSR$  représente toujours le nombre maximal de requêtes de synchronisation avec un nœud. lorsque  $MSR$  est atteint, une nouvelle tentative de synchronisation est effectuée avec la nouvelle procédure de synchronisation. Elle emploie le décalage  $\beta$  de l'instant de réveil du nœud courant.  $MSS$  (*Maximum Synchronization Sending*) est le nombre maximal de balises à générer avec un drapeau  $IS$  mis à vrai après un processus réussi

**Algorithme 5.1** Algorithme gérant  $MSR$  et  $nbrSynchRetry$ 


---

```

si  $nbrSynchRetry < MSR$  alors
  envoyer une balise avec :  $RS = vrai$  et  $SN = packetToSend \rightarrow Addr$ 
   $nbrSynchRetry \leftarrow nbrSynchRetry + 1$ ;
sinon
   $nbrSynchRetry \leftarrow 0$ ;
  performSynchronizationAttempt();
fin

```

---

de synchronisation. Cette variable est nécessaire, car elle permet d'éviter l'envoi des informations inappropriées sur l'état de synchronisation du nœud courant avec un autre nœud. Ainsi, le nœud courant doit remettre le drapeau  $IS$  de sa balise à faux soit, après  $MSS$  envoi, ou la fin de communication entre les deux nœuds synchronisés. Cela offre aux autres nœuds la possibilité de demander la synchronisation avec celui synchronisé avec le nœud courant. Et pour pouvoir gérer le nombre de transmissions de ce type de balises, nous utilisons la variable  $nbrSynchSending$ . Elle compte le nombre balises envoyée avec un drapeau  $IS$  mis à vrai qui indique la synchronisation avec un nœud. L'algorithme 5.2 résume le fonctionnement introduit dans la gestion de l'évènement de réception de la balise avec l'utilisation des nouveaux paramètres et variables. En plus des valeurs des paramètres précitées dans le tableau 5.1, nous avons utilisé les valeurs des paramètres additionnels listés dans le tableau 5.2. Dans ce tableau nous n'avons pas précisé la valeur

TABLE 5.2 – Paramètres additionnels de synchronisation de WideMac.

Paramètre	Valeur
$\beta$	–
$MSR$	6
$MSS$	14

du paramètre  $\beta$  puisqu'il sera étudié avec plusieurs valeurs.

### 5.3.3 Évaluation

#### 5.3.3.1 Les paramètres $T_a$ et $\beta$

Les deux paramètres  $T_a$  et  $\beta$  sont des paramètres critiques pour le mécanisme de synchronisation proposé. Cela est dû au fait que leurs valeurs affectent considérablement les performances et le rendement du réseau.

$T_a$  représente le temps d'activité, il paramètre la disponibilité des nœuds, c'est-à-dire leur capacité à communiquer entre eux. Il est choisi tel que  $0 < T_a \leq T_W$ . Par conséquent, si la valeur de  $T_a$  est proche de  $T_W$ , le nœud est plus disponible mais avec une consommation d'énergie élevée. D'autre part, si  $T_a \ll T_W$ , le nœud est moins disponible, mais avec une consommation d'énergie optimisée. Par conséquent, le paramètre  $T_a$  influence directement la consommation d'énergie ainsi que la disponibilité du nœud et doit être choisi avec une valeur appropriée. Une étude de leur impact sur le taux de livraison de paquets a été

**Algorithme 5.2** Algorithme gérant l'événement de réception de la balise

---

```

si beacon → RS = vrai alors
    synchronizeWith(beacon → srcAddr)
sinon
    si packetToSend → Addr = beacon → srcAddr et beacon → IS = vrai et beacon →
    SN = myAddr alors
        nbrSynchRetry ← -1;
        synchSrc ← (beacon → srcAddr);
        CW ← -1;
        transmitPacket();
    sinon
        si CW ≤ 0 alors
            si packetToSend → Addr = beacon → srcAddr alors
                si beacon → AB = faux et CW = 0 alors
                    transmitPacket();
                sinon
                    performeBackoff(beacon → BE );
                finsi
            finsi
        sinon
            CW ← CW - 1;
        finsi
    finsi
finsi

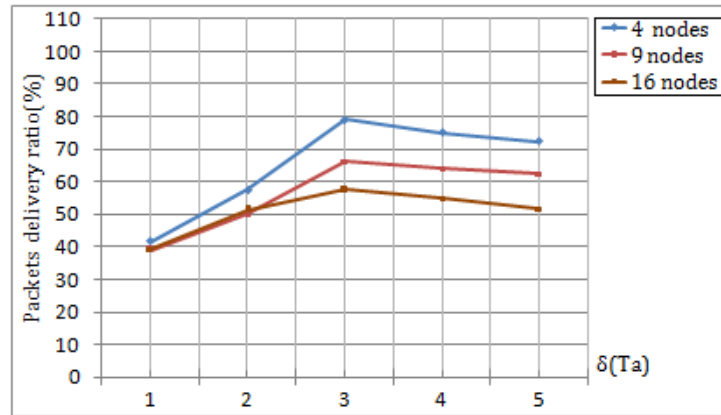
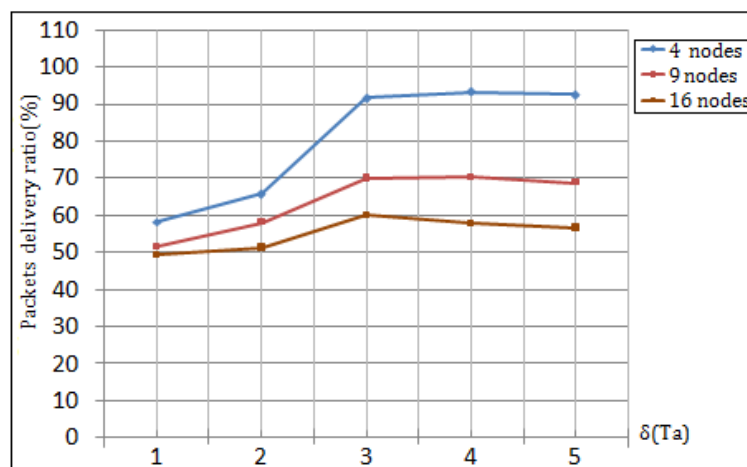
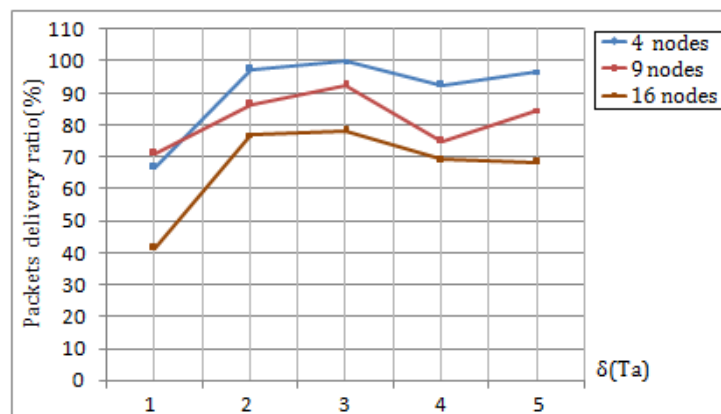
```

---

réalisée afin de déterminer les valeurs qui donnent les meilleurs résultats et qui accroissent l'efficacité du protocole WideMac.

Nous avons choisi d'étudier  $T_a$  avec les valeurs suivantes : 5%, 10% et 15% de  $T_W$ . La valeur max étudié  $T_a = 15\%T_W$  a été adoptée pour limiter la consommation d'énergie acceptable, étant donné que notre objectif dans ce travail est l'optimisation de l'énergie. Les valeurs  $\beta$  ont été étudiées entre  $1T_a$  et  $5T_a$ .

Des simulations sont effectuées avec les valeurs suivantes du paramètre  $T_a$  :  $T_a = 5\%T_W$ ,  $T_a = 10\%T_W$  et  $T_a = 15\%T_W$  et  $\beta$  variant de 1 à  $5T_a$ . En conséquence, les valeurs  $\beta$  varient de 5% à 75% $T_W$ . Les résultats sont présentés respectivement dans les figure 5.8, 5.9 et 5.10. Les courbes des trois figures montrent la variation du rapport de livraison de paquets selon le paramètre  $\beta$ . Dans ces figures, on constate que ce rapport varie entre 39 et 80 pour cent dans la figure 5.8, entre 49 et 92 pour cent dans la figure 5.9 et entre 42 et 100 pour cent sur la figure 5.10. En plus, les trois figures montrent que ce rapport diminue lorsque le nombre de nœuds augmente. Le taux de diminution de livraison de paquets avec le nombre de nœuds est normal, puisque le réseau devient de plus en plus chargé et les nœuds doivent concurrencer pour se synchroniser et envoyer des données. En outre, dans toutes les courbes nous observons que la valeur de  $\beta$  qui donne le meilleur taux de livraison de paquets pour toutes les valeurs de  $T_a$  est  $\beta = 3T_a$ . Et la valeur  $T_a$  qui donne plus de débits est  $T_a = 15\%T_W$ .

FIGURE 5.8 – Taux de livraison des paquets pour  $T_a = 0.05 * T_W$ .FIGURE 5.9 – Taux de livraison des paquets pour  $T_a = 0.1 * T_W$ .FIGURE 5.10 – Taux de livraison des paquets pour  $T_a = 0.15 * T_W$ .

### 5.3.3.2 Taux de livraison des paquets

Afin d'assurer une qualité de service acceptable dans n'importe quel protocole MAC, le rapport de livraison de paquets est une métrique obligatoire. En conséquence, cette section présente les résultats obtenus concernant cette métrique. La première partie de

cette section traite le scénario faisant intervenir 16 nœuds, et la seconde traite le rapport de livraison des paquets pour des scénarios avec différents nombre de nœuds. La sous section 5.3.1 a présenté le problème de non communication entre certains nœuds. Après la mise en œuvre de notre mécanisme de synchronisation proposé, la figure 5.11 montre clairement que ce problème a été résolu avec succès, puisque dans le même scénario de simulation (16 nœuds) tous les nœuds ont envoyé plus de 55 paquets sur 100. Les résultats sont obtenus avec la version synchronisée de WideMac avec les valeurs des paramètres suivants :  $\beta = 3Ta$  et deux valeurs de  $Ta$  : 15% et 10% $T_W$ . Il montre également que la valeur  $Ta = 15\%T_W$  donne plus de paquets envoyés par rapport à la valeur  $Ta = 10\%T_W$ .

La figure 5.12 montre les résultats de simulation obtenus avec les deux versions synchronisées de WideMac en utilisant les paramètres suivants :  $\beta = 3Ta$  et  $Ta = 15\%T_W$ . Elle montre une amélioration remarquable en termes de taux de livraison des paquets dans le protocole WideMac après la mise en œuvre des deux mécanismes de synchronisation. Elle montre en particulier la valeur ajoutée du mécanisme de synchronisation proposé dans le présent travail. Nous voyons que le taux de livraison de paquets dans le cas de synchronisation complète dépasse 70% pour le scénario 36 nœuds, et 93% pour le scénario 9 nœuds.

En même temps, la même figure montre une diminution du taux de livraison de paquets pour tous les scénarios avec l'augmentation du nombre de nœuds. Ce fait a été discuté dans la sous-section 5.3.3.1. La diminution remarquable dans les performances du protocole originale WideMac avec l'augmentation du nombre de nœuds est due au problème d'absence de communication, ainsi que le problème de congestion.

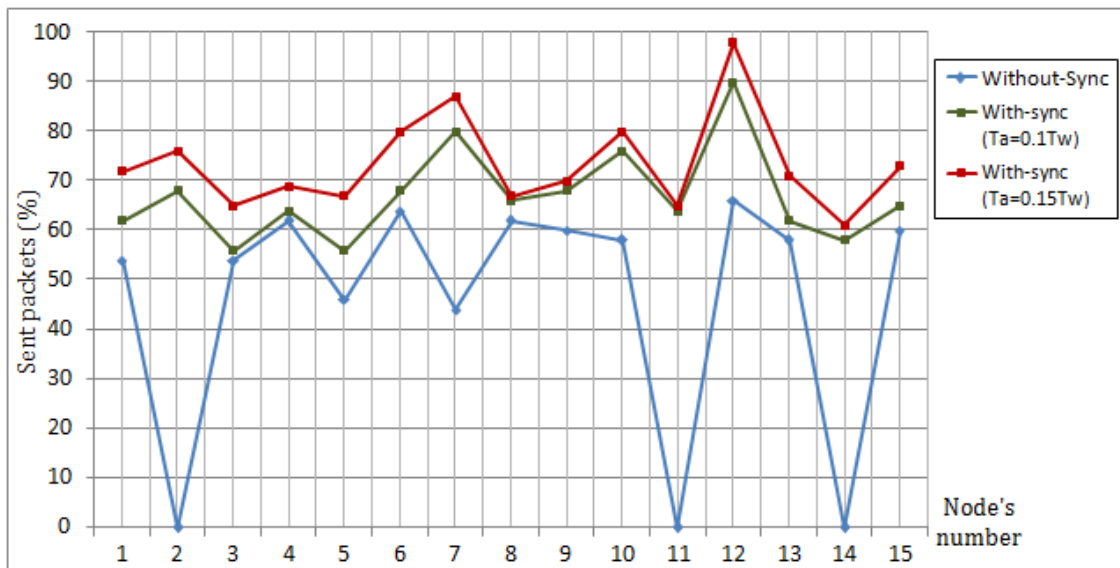


FIGURE 5.11 – Livraison de paquets pour le scénario 16 nœud.

### 5.3.3.3 Consommation énergétique

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus en utilisant les paramètres de synchronisation des périodes de réveil, ainsi que ceux de temporisation et de l'énergie du transmetteur-récepteur radio cités dans les tableaux 4.1, 4.2 5.1 et 5.2 . La consommation

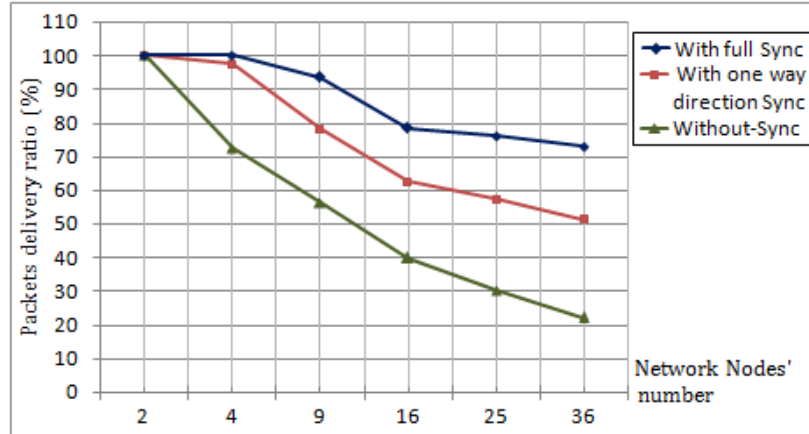


FIGURE 5.12 – Taux de livraison des paquets.

d'énergie optimisée du protocole WideMac avec et sans synchronisation s'est concrétisée par les résultats représentés à la figure 5.13. Elle montre que la consommation d'énergie de WideMac avec le mécanisme de synchronisation pour  $T_a = 10\%$  et  $15\%T_W$  est remarquablement inférieure à la consommation d'énergie du protocole WideMac originale. La même figure montre que la consommation dans le cas  $T_a = 20\%T_W$  est supérieure à la consommation du protocole WideMac (sans synchronisation). En outre, les courbes montrent clairement que la consommation d'énergie augmente avec l'augmentation de la valeur du paramètre  $T_a$ . Ce fait a déjà été discuté dans la sous-section 5.3.3.1, et nous avons vu que la période active  $T_a$  influencent directement la consommation car la radio des nœuds dans les périodes  $T_a$  n'est pas en mode d'endormissement. En outre, WideMac a été présenté comme un protocole à faible consommation d'énergie, car il met les nœuds dans leur mode d'endormissement la majorité de leur temps fenêtre  $T_W$ . Donc, pour avoir une consommation d'énergie optimale, nous avons limité la période d'activité  $T_a$  des nœuds à  $15\%T_W$ .

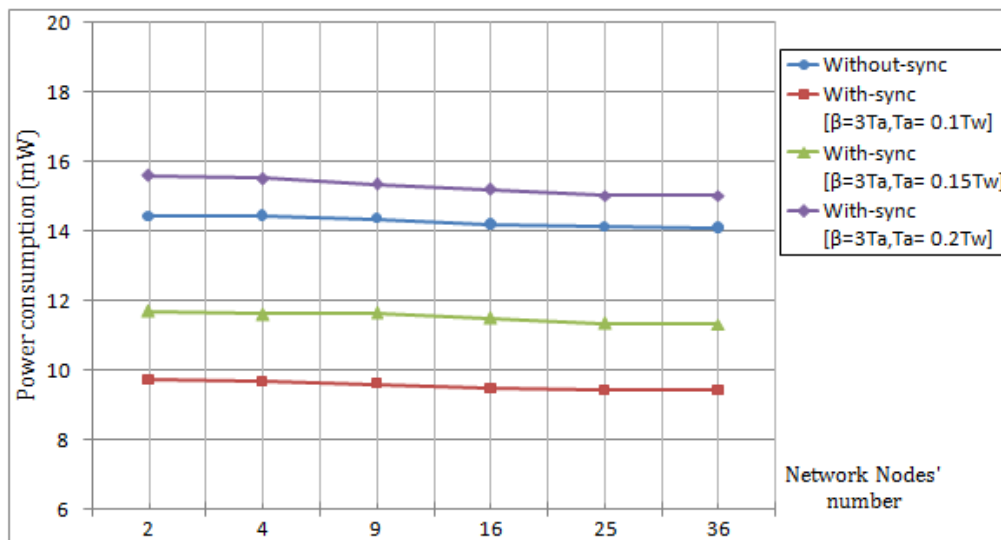


FIGURE 5.13 – Consommation moyenne de l'énergie des nœuds.

## 5.4 Protocole SWIMAC

Après la résolution des problèmes précédemment exposés dans les deux sections 5.2 et 5.3 et après l'intégration d'un mécanisme de gestion des messages de diffusion, nous avons choisi le nom SWIMAC ("Synchronized WideMAC" ou WideMac synchronisé) pour ce protocole. La présente section présente ainsi, les résultats obtenus de notre travail publié dans [155] en plus de la solution qui a été implémentée dans notre protocole pour palier au problème d'absence d'un mécanisme pour la prise en charge des messages de diffusion. En plus d'une introduction des paramètres pertinents du protocole SWIMAC, nous expliquerons le son fonctionnement avec deux diagrammes simplifiés. Finalement, les résultats de son évaluation sur un RCSF à base d'IR-UWB sont donnés.

### 5.4.1 Gestion des messages de diffusion

Le problème de la prise en charge des messages de diffusion est rencontré parce qu'un nœud utilisant ce protocole ne peut pas diffuser un message à tous ses voisins. Cela se produit, puisque ces derniers sont la plupart du temps  $T_W$  en leurs périodes d'inactivité  $T_{sleep}$ . En plus, c'est presque impossible de trouver tous les nœuds en écoute pour recevoir un message de diffusion.

La solution de ce problème a été rendue possible grâce à une demande spéciale de synchronisation pour envoyer un message de diffusion. Cette demande de synchronisation est émise par le nœud désirant diffuser un message. Comme ça, les périodes  $T_W$  de chaque nœud doivent être dans l'un des trois états suivants : période normale, période de demande de synchronisation pour diffuser un message, et période d'envoi de données de diffusion. L'état de la période  $T_W$  d'un nœud est déterminé par le type du message en cours de transmission.

Durant la période de demande de synchronisation pour diffuser un message, le nœud transmetteur envoi des balises à des intervalles réguliers égales à  $T_a$  (temps d'activité). Et l'envoi donc de chaque balise ce produit dans une fenêtre de numéro  $N_W$  entre 1 et  $N$ . Ce nombre  $N$  est le nombre total des balises à envoyer durant la période  $T_W$  ; il est donné par :

$$N = E\left(\frac{T_W}{T_a}\right) \quad (5.1)$$

Avec  $E$  c'est la fonction retournant la partie entier. Les balises envoyées durant cette période, sont transmis avec le champ  $NW$  contenant l'ordre des fenêtres durant lesquelles elles ont été transmises. Ainsi, la structure finale du message balise(beacon) utilisé dans le protocole SWIMAC est décrite dans le tableau 5.3.

À fin de se synchroniser avec le nœud transmetteur du message de diffusion, le nœud qui recevra la balise de demande de synchronisation pour diffuser un message va utiliser ce champ pour planifier son prochain instant de réveil  $t_{rv}$ . Cet instant est donné par :

$$t_{rv} = t + T_W - T_a * NW \quad (5.2)$$

où  $t$  est le temps où le nœud courant a reçu le message balise.

Dans la période d'envoi de données de diffusion, le nœud transmetteur envoie un ou plusieurs trames de diffusion (selon le paramètre  $maxBroadcastDataTx$ ) directement sans

TABLE 5.3 – Structure simplifié d'un message balise.

Champs	Signification	Type
BE : BackoffExponent	Exposant BackOff	Entier
SN : SynchronizedNode	Nœud synchronisé	Adresse
NW : Number Window	Numéro de fenêtre	Entier
AB : AlwaysBackoff	Toujours un BackOff	Boolean
IS : Is Synchronized	Est synchronisé	Boolean
RS : RequiresSynchronization	Nécessite une synchronisation	Boolean

attendre la réception de balises. Cela est possible puisque ce dernier est sûr que ses nœuds voisins sont synchronisés avec lui et attendent ses messages de diffusion.

### 5.4.2 Algorithme de Backoff

Le principe de l'algorithme de backoff utilisé par le protocole WideMac que nous appellerons M-BEB (*Modified Binary Backoff Exponent*) a été maintenu dans le protocole SWIMAC. Comme résumé de son principe de fonctionnement, les deux algorithmes 5.3 et 5.4 représentent respectivement la politique du maintien du  $BE$  local et la fonction  $NBO(\dots)$  permettant de calculer la nouvelle fenêtre de contention. Cette dernière prend comme paramètre, l'exposant backoff reçu dans le message balise du nœud destination.

---

**Algorithme 5.3** Politique du maintien du  $BE$  localement.

---

```

 $BE \leftarrow \min BE;$ 
Pour chaque tentative de réception :
si échec de décodage alors
     $BE \leftarrow \min(BE * 2, \max BE);$ 
sinon
     $BE \leftarrow \max(BE - 1, \min BE);$ 
finsi

```

---



---

**Algorithme 5.4** Fonction  $NBO()$  de calcul de la fenêtre de contention.

---

```

Entrées:  $BE_{rec}$ 
Sorties: La fenêtre de contention
 $N \leftarrow \text{aléatoire}(0, 2^{BE_{rec}} - 1);$ 
retourner  $N;$ 

```

---

Les opérations de backoff réalisées dans la procédure  $backoffOperations(\dots)$  consistent à calculer la valeur de la fenêtre de contention et mettre-à-jour les variables gérant le nombre de retransmission, ainsi que le nombre d'essai de synchronisation avec un nœud. à l'échec de retransmission d'un message, cette procédure le supprime de sa queue.

---

**Algorithme 5.5** Procédure **backoffOperations(newCW)** réalisant les opérations de backoff.

---

**Entrées:**  $newCW$  : *Boolean*

**si**  $txAttempts < maxTxAttempts$  **alors**

**si**  $newCW = vrai$  **alors**

$CW \leftarrow NBO(BE_{rec})$ ;

**finsi**

$txAttempts \leftarrow txAttempts + 1$ ;

**sinon**

$CW \leftarrow -1$ ;

$txAttempts \leftarrow 0$ ;

    delete Pckt;

**si**  $nbrSynchRetry \neq -1$  **alors**

$nbrSynchRetry \leftarrow 0$ ;

**finsi**

**finsi**

---

### 5.4.3 Diagrammes de fonctionnement de SWIMAC

Comme WideMac, SWIMAC utilise un algorithme de backoff pour gérer les retransmission et éviter les collisions. L'accès à une fenêtre de contention  $CW$  est choisi aléatoirement pour un nœud transmetteur, et la valeur de cette fenêtre varie entre 0 et  $2^{BE_{rec}} - 1$ . Ainsi, ce nœud transmetteur ne peut envoyer son paquet que dans la fenêtre désignée par l'algorithme de backoff. Dans le cas particulier où la valeur de la fenêtre choisie est égale à 0, la transmission se fera dans la fenêtre courante. Partant, le nœud est considéré dans un statut récepteur RX lorsqu'il n'a aucun paquet à envoyer, ou lorsqu'il n'a pas encore atteint la fenêtre de contention désignée pour la transmission. Autrement, il est considéré dans un statut transmetteur TX.

Le statut TX ou RX fait référence au mode de fonctionnement du protocole durant toute une période  $T_W$ . ce statut ne change pas durant toute cette période  $T_W$  et n'a pas de relation avec les deux états Tx ou Rx de la radio, car durant une période  $T_W$  l'état de la radio est basculé d'un état à un autre à plusieurs reprises selon les besoins (voire figure 4.16).

Le fonctionnement de SWIMAC varie selon son statut. Les deux sous-sections ci-après expliquent ce fonctionnement dans les deux cas TX et RX.

#### 5.4.3.1 Statut TX

Après le réveil, et durant ce statut transmetteur, le nœud envoie son message balise (beacon), et peut envoyer un paquet, comme il peut recevoir un paquet de donnée et l'acquitter. Si une procédure de synchronisation est requise, le nœud l'effectuera avant son endormissement. Ce fonctionnement est détaillé dans la figure 5.14. Cette figure montre qu'un nœud peut se trouver dans l'un de six états suivants : *SLEEP*, *SEND\_BEACON*, *WAIT\_DATA\_BEACON*, *SEND\_DATA*, *SEND\_ACK*, *WAIT\_ACK*.

Entre les deux états *SLEEP* et *SEND\_BEACON*, le nœud construit les champs de



pas à décoder ce paquet à cause d'une collision par exemple, il double la valeur de BE. Ensuite, il vérifie si elle-y-a eu une demande de synchronisation et revient à l'état *SLEEP*.

- ★ Si le temps d'attente découle, le nœud décrémente la valeur de la fenêtre de contention *CW*, puis il revient à l'état *SLEEP* après qu'il vérifie si elle-y-a eu une demande de synchronisation.
- ★ Si il reçoit la balise attendue :
  - Première réception ( $CW < 0$ ) : il effectue l'opération de backoff avec la valeur de la fenêtre retournée par la fonction *NBO()*(voir algorithme 5.4) et revient à l'état *SLEEP*. Dans le cas particulier où la valeur de la fenêtre est égale à 0 avec un drapeau AB égal à faux, le nœud passe à l'état de transmission *SEND\_DATA*.
  - Réception autre que la première fois ( $CW = 0$ ) : le nœud passe l'état de transmission *SEND\_DATA*.

Dans l'état *SEND\_DATA*, le nœud attend la fin de transmission des données puis passe à l'état *WAIT\_ACK*.

Dans ce dernier état, le nœud supprime le paquet de sa queue et réinitialise ses variables (*CW* et *txAttempt*) dans les deux cas suivants : lorsqu'il reçoit l'acquittement attendu ou à l'échec de réception de ce dernier avec le dépassement du nombre de retransmission maximal *maxTxAttempt*. Et dans le même cas d'échec de réception de l'acquittement sans que le nombre de retransmission atteigne *maxTxAttempt*, le nœud incrémente ce nombre de retransmission (ces opérations sont réalisées dans la procédure *backoffOperations(False)*, voir algorithme 5.5). Dans ces trois cas, et avant de revenir à l'état *SLEEP*, le nœud vérifie si elle-y-a eu une demande de synchronisation.

#### 5.4.3.2 Statut RX

Après le réveil, et durant ce statut récepteur, le nœud envoie son message balise (beacon), et peut recevoir un paquet de donnée et l'acquitter. Si une procédure de synchronisation est requise, le nœud l'effectuera avant son endormissement. Ce fonctionnement est détaillé dans la figure 5.15. A la différence du statut TX, dans le statut RX, le nœud n'envoie aucun paquet de donnée. C'est pourquoi les deux états *SEND\_DATA*, et *WAIT\_ACK* ont disparu. Les autres états ont été conservés avec le presque le même fonctionnement.

### 5.4.4 Evaluation

#### 5.4.4.1 Paramètres de synchronisation

Comme décrit dans la présentation du protocole WideMac,  $T_W$  est également la période de réveil caractéristique de SWIMAC.  $T_a$  est la durée d'activité des nœuds durant laquelle ils sont en attente d'un message de donnée ou de messages balise.

Pour tester et évaluer les performances de notre protocole SWIMAC, nous avons comparé son rendement et ses performances avec WideMac. Cela a été possible grâce à des simulations réalisées avec la plateforme MiXiM sous OMNet++. Pour ces raisons, nous avons enrichi le package de la couche MAC déjà introduit dans la sous-section 4.8.3 avec la nouvelle classe "*SWIMACLayer*". Le tableau 5.4, liste les valeurs des paramètres

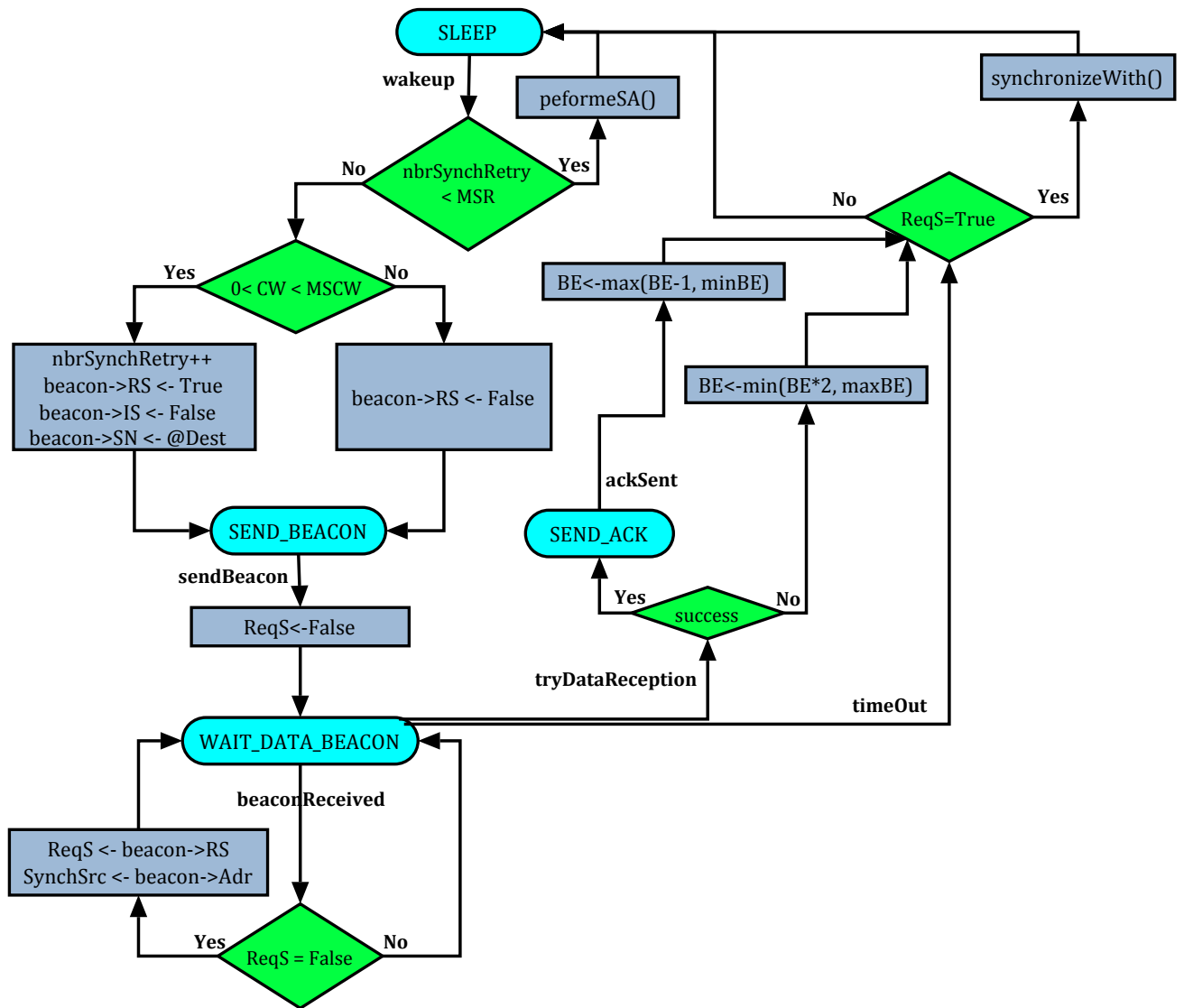


FIGURE 5.15 – Digramme de fonctionnement de SWIMAC durant le statut RX.

de la couche MAC de simulation ainsi utilisées. Pour ceux de la couche physique, nous avons conservé ceux utilisés auparavant (voir les deux tableaux 4.1 et 4.2).

#### 5.4.4.2 Taux de livraison des paquets

Le Taux de Livraison des Paquets (TLP) est une métrique importante pour évaluer n'importe quel protocole MAC. C'est le nombre total des paquets reçus sur le nombre total des paquets générés. Les résultats représentés sur la figure 5.16 montrent l'amélioration remarquable en termes de taux de livraison des paquets dans le protocole SWIMAC par rapport au protocole WideMac. Ces expériences prouvent et montrent clairement l'amélioration qu'a apportée l'introduction du mécanisme de synchronisation dans le protocole

TABLE 5.4 – Paramètres MAC.

Paramètre	Valeur	WideMac	SWIMAC
$T_W$	0.04s	✓	✓
$T_a$	15% $T_W$	✓	✓
$\beta$	3 $T_a$		✓
$MSCW$	7	✓	✓
$MSR$	4		✓
$MSS$	8		✓
$maxBroadcastDataTx$	4		✓
$maxTxAttempts$	15	✓	
$macAckWaitDuration$	0.0004s	✓	✓
$minBE$	1	✓	✓
$maxBE$	4	✓	✓

WideMac. Les deux courbes supérieures haut et bas représentent respectivement le TLP pour le protocole SWIMAC dans les deux cas  $T_a = 15\%T_W$  et  $T_a = 10\%T_W$ . Pour le premier cas ce taux varie entre 100% dans les cas de 2 et 4 nœuds, et 54.3% pour le cas de 36 nœuds. Et dans le deuxième cas, ce taux varie entre 100% dans le cas de 2 nœuds et 40.57% pour le cas de 36 nœuds. Concernant les deux courbes inférieures haut et bas, ils représentent respectivement le TLP pour le protocole WideMac dans le cas  $T_a = 15\%T_W$  et  $T_a = 10\%T_W$ . Pour  $T_a = 15\%T_W$  ce taux varie entre 100% dans les cas de 2 nœuds, et 16.2% pour le cas de 36 nœuds. Et dans le deuxième cas où  $T_a = 10\%T_W$ , ce taux varie entre 100% dans le cas de 2 nœuds et 14.7% pour le cas de 36 nœuds.

Cette figure montre aussi que le TLP diminue avec l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau. Cette diminution est normale, puisque le réseau devient de plus en plus chargé avec cette augmentation. Conséquemment, il en résulte une augmentation du nombre de voisins de chaque nœud. Ceci oblige ces derniers à entrer en concurrence avec un nombre de nœuds concurrents qui augmente avec le nombre de nœuds du réseau. Cette concurrence va produire l'augmentation des transmissions et ainsi la possibilité d'occurrence de collisions. De cette façon et puisque le nombre de retransmission est limité avec le paramètre  $maxTxAttempts$ , l'échec de transmission de certains paquets et donc de leur suppression est inévitable. Ce fait influence directement la métrique TLP. Et on constate évidemment sa dégradation avec l'augmentation du nombre de nœuds.

#### 5.4.4.3 Consommation énergétique

Les nœuds dans un réseau de capteurs sont alimentés par une batterie. La gestion de l'énergie est un facteur important dans la conception des protocoles pour ce type réseaux, notamment dans les couches MAC et physique. Cela est dû au fait que la consommation de l'énergie dans les capteurs affecte la durée de vie du réseau, ce qui entraîne que le protocole MAC et la couche physique doivent être optimisés afin que l'énergie consommée soit directement utilisée pour le trafic généré et non au temps de travail complet du nœud. Dans la présentation de SWIMAC, ce dernier est très optimal coté consommation d'énergie.

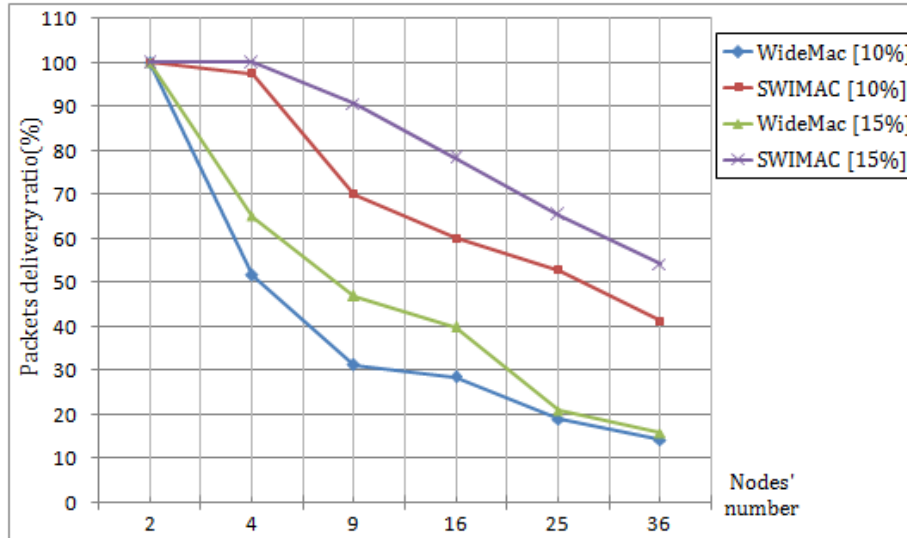


FIGURE 5.16 – Taux de livraison des paquets.

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation obtenus en utilisant les paramètres de synchronisation et énergétiques cités dans les tableaux 4.1, 4.2 et 5.4 avec des paquets de données de 512 octets. La faible consommation d'énergie de WideMac et SWIMAC par rapport à ALOHA a été concrétisée par les résultats de la figure 5.17. D'après cette figure, la consommation du protocole ALOHA varie entre  $99.86mW$  par unité de temps pour le cas de 2 nœuds et  $99.28mW$  pour le cas de 36 nœuds. Pour le protocole SWIMAC et avec  $T_a = 15\%T_W$ , elle varie entre  $14.67mW$  par unité de temps pour le cas de 2 nœuds et  $13.8mW$  pour le cas de 36 nœuds. Aussi pour le cas  $T_a = 10\%T_W$ , elle varie entre  $9.81mW$  par unité de temps pour le cas de 2 nœuds et  $9.23mW$  pour le cas de 36 nœuds. La consommation du protocole WideMac et avec  $T_a = 15\%T_W$  varie entre  $14.9mW$  par unité de temps pour le cas de 2 nœuds et  $14.19mW$  pour le cas de 36 nœuds. Aussi pour le cas  $T_a = 10\%T_W$ , elle varie entre  $10.1mW$  par unité de temps pour le cas de 2 nœuds et  $9.38mW$  pour le cas de 36 nœuds.

Ces résultats montrent que la consommation d'énergie des deux protocoles WideMac et SWIMAC est remarquablement inférieure à celle du protocole ALOHA. Elle montre également que même avec l'introduction du mécanisme de synchronisation, le protocole SWIMAC conserve la principale caractéristique de WideMac qui est sa ultra-faible consommation énergétique. En même temps, ils montrent également que la durée de la période active ( $T_a$ ) des nœuds influence clairement la consommation d'énergie dans les deux protocoles WideMac et SWIMAC. C'est pour cette raison que nous avons limité l'étude des performances des deux protocoles WideMac et SWIMAC à une période active  $T_a = 15\%T_W$  pour garder une consommation énergétique dans les limites des attentes de la performance en énergie de ces deux protocoles.

## 5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le protocole SWIMAC. C'est un protocole MAC avec une consommation d'énergie ultra-faible et paramétrable, à accès aléatoire asyn-

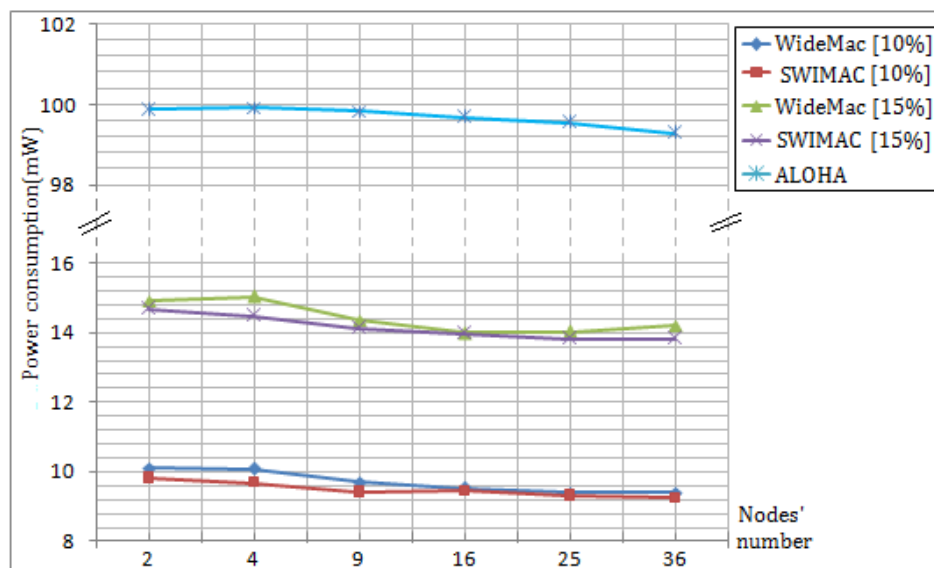


FIGURE 5.17 – Consommation moyenne de l'énergie des nœuds.

chronne au médium de transmission, indépendamment du mécanisme de détection de porteuse utilisé par la majorité des protocoles MAC. Il implémente le mécanisme des transmissions acquittées pour éviter les pertes de paquets dues aux collisions et aux interférences et automatisant ainsi les retransmissions. Ces dernières sont faites avec un algorithme de backoff paramétrable et offrant une adaptabilité aux contraintes de densité des nœuds dans le réseau. L'emploi des messages balises couplé avec le mécanisme d'accès aléatoire avec un algorithme de backoff efficace a remarquablement diminué les effets des collisions et des interférences.

L'implémentation du mécanisme de synchronisation a introduit l'utilisation de plusieurs paramètres qui ont servi à harmoniser les périodes d'activité des nœuds. Cette harmonisation a offert plus de chances pour ces nœuds à disséminer leurs paquets dans tous les sens et palier donc aux problèmes de rupture de communication aussi bien que de la communication dans un seul sens. Le paramètre  $T_a$  déterminant le temps d'activité reste un paramètre clé aussi bien dans WideMac que dans SWIMAC. Ceci est dû à son effet sur la consommation de l'énergie d'une part, et d'autre part sur la disponibilité des nœuds à interagir et communiquer entre eux. Il peut servir subséquentement à configurer SWIMAC suivant le contexte d'utilisation ainsi que densité et la surcharge du réseau. Cette configuration peut se faire par une demande de la couche application, qui décidera les valeurs adéquates selon l'état du réseau.

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'évolution et l'émergence des technologies sans fil dans le domaine des réseaux ont marqué la première décennie de ce siècle. UWB représente l'une des technologies les plus prometteuses du domaine, notamment par les capacités exceptionnelles qu'elle offre et ainsi par les occasions qu'elle a ouvertes pour accélérer l'évolution et élargir le paysage d'application des communications sans fil à courte portée. L'approche mono-bande impulsionnelle de l'UWB a suscité un intérêt sans précédent des chercheurs dans le domaine des réseaux ad-hoc et celui des réseaux de capteurs sans fil en particulier. Cet intérêt est motivé, d'une part, par le besoin croissant en débit et en faible puissance de communication. D'autre part, par les caractéristiques et les avantages intrinsèques de l'IR-UWB, surtout du point de vue optimisation de la consommation, débit élevé et robustesse aux interférences. L'étude de cette technologie ainsi que son applicabilité dans le domaine des RCSFs nous ont motivés durant nos travaux de recherche dans cette thèse. En particulier, notre objectif était de concevoir un protocole de la couche MAC pour les RCSFs à base IR-UWB. Ce protocole doit répondre aux exigences côté optimisation de la consommation d'énergie ainsi que de rendement.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de la résolution de deux problématiques majeures qui influencent les performances et le rendement dans les RCSFs :

La première problématique concerne la consommation d'énergie. Sa considération est motivée par plusieurs raisons. La première est liée à l'autonomie de ce type de réseaux : où les capteurs sont souvent déployés dans des environnements isolés ou inaccessibles et que leurs batteries à faible puissance ne peuvent pas être rechargées. La deuxième est liée à la forte dépendance de la vie du RCSFs des batteries des différents capteurs composants le réseau. Ainsi, l'épuisement de la batterie de certains nœuds peut entraîner une panne du réseau entier. Partant, La consommation d'énergie dans les RCSFs est une contrainte inévitable qui a changé beaucoup de considérations pour ce type de réseaux. Parmi ces considérations, nous trouvons la conception de la couche physique et de la couche MAC qui n'ont plus les mêmes contraintes que ceux des autres réseaux sans fil. Ainsi, les protocoles MAC conçus pour les réseaux sans fil ne sont pas convenables aux réseaux de capteurs et plus précisément aux RCSFs à base d'IR-UWB. Ils nécessitent donc une redéfinition pour prendre en considération la contrainte d'énergie.

La deuxième problématique concerne le rendement en général et le taux de livraison des paquets en particulier. Cette dernière métrique a une relation directe avec l'efficacité et la fiabilité du protocole d'accès au médium utilisé dans la couche MAC.

Dans ce contexte, un état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil est introduit dans

le deuxième chapitre. Il nous a permis d'avoir une vision globale sur ce type de réseaux ainsi que les défis majeurs rencontrés. Il nous a permis aussi de montrer l'influence directe des choix dans les deux couches physique et MAC sur l'efficacité énergétique des transmissions radio. Et particulier, les stratégies d'optimisation de consommation des RCSFs dans la couche physique devaient reposer sur la recherche et l'intégration d'une technologie de transmission sans fil à très basse consommation. Pour cette raison, ce chapitre introduit aussi les différentes technologies de transmission sans fil et met l'accent sur la nouvelle technologie IR-UWB.

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude des performances d'IR-UWB dans les RCSFs. La simplicité d'intégration et l'impact positif de cette nouvelle technologie sur ce type de réseaux ont été montrés dans ce chapitre. Ainsi, sa comparaison avec les deux technologies Zigbee et Bluetooth en termes de rendement et de consommation énergétique a confirmé et jugé notre choix. Après cette analyse, l'étude de l'impact des choix relatifs aux protocoles MAC nous a permis de montrer que cette couche était déterminante dans les performances finales d'un RCSFs.

Quant au quatrième chapitre, il dresse comme objectif l'étude des performances énergétiques des protocoles MAC dans les réseaux de capteurs. L'importance de cette opération est considérée car l'état de la radio de l'émetteur-récepteur est contrôlé par le protocole MAC déployé. Ainsi, nous avons présenté un état de l'art sur les protocoles MAC dédiés aux RCSFs à base d'IR-UWB. Et nous avons présenté et étudié en détail un protocole à très basse consommation basé sur le mécanisme de *Duty-cycling* dédié à ce type de réseaux et qui fonctionne avec la norme IEEE802.15.4a. Ensuite, nous avons présenté une étude analytique de sa consommation d'énergie ainsi que son évaluation par simulation. Enfin, nous avons introduit le problème d'absence de synchronisation entre les périodes de réveil de ce protocole.

Dans le cinquième chapitre, nous avons exposé les problèmes de synchronisation dont souffre le protocole WideMac. Ils rendent ce dernier limité en termes de performance car ils provoquent l'absence et la rupture de communication entre certains nœuds du réseau. En plus, nous avons présenté les mécanismes de synchronisation qui ont été proposés afin de pallier à ces problèmes. Ces mécanismes intégrés dans le protocole WideMac ont nettement amélioré son rendement. Ainsi, Les résultats de simulation obtenus dans ce chapitre montrent clairement une amélioration significative en termes de taux de livraison des paquets. L'implémentation de ces deux mécanismes de synchronisation, ainsi que l'intégration d'un mécanisme de gestion des messages de diffusion ont donné naissance à la nomenclature du protocole SWIMAC. Le reste de ce chapitre fait la présentation du fonctionnement et l'évaluation des performances de ce protocole.

Les recherche dans l'optimisation des ressources et l'amélioration des performances des RCSFs à base d'IR-UWB ne cessent pas de prendre envergure dans ces dernières années. Nous proposons dans la suite de ce travail de développer un nouveau protocole de la couche réseau adapté aux spécificités du protocole SWIMAC dédié aux RCSFs à base d'IR-UWB et tirer profit de ses caractéristiques afin de diminuer davantage l'énergie consommée. Aussi nous voulons tester notre protocole SWIMAC sur une architecture matérielle réelle de RCSFs à base d'IR-UWB.



---

## LISTE DES PUBLICATIONS

### Journaux internationaux :

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "No Communication Nodes Synchronization for a Low Power Consumption MAC Protocol in WSN based on IR-UWB", Journal of Communications Software and Systems, Vol. 10, No. 2, pp.90-98, June 2014.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "Performance Evaluation of WideMac Compared to ALOHA in term of Energy Consumption for IR-UWB based WSN", Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence, Vol. 6, No. 1, pp. 54-58, Feb 2014.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "Synchronized WideMac (SWI-MAC) : A New Efficient MAC Protocol for IR-UWB Based WSN", European Journal of Scientific Research, Vol. 106, No. 1, pp. 52-75, 2013.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "Performance Evaluation of IR-UWB Compared to Zigbee in Real time Applications for Wireless Sensor Networks", Journal of Convergence Information Technology , Vol. 8, No. 15, pp. 1-12, 2013.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "One Way Direction Communication Synchronization for WideMac Protocol in IR-UWB based WSN", International Journal of Computer Networks and Communications Security, Vol. 1, No. 5, pp. 173-179, October 2013.

### Conférences internationales :

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "Energy Consumption of IR-UWB based WSN in a Start Topology", IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, pp. 663-667, April 14-16, 2014, Marrakech, Morocco.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "A Study with Simulation of Power Consumption and Latency for MAC Protocols in WSN based on IR-UWB Transceiver", The 2nd IEEE World Conference on Complex Systems, November 10-12, 2014, Agadir, Morocco.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "An Efficient Short Range Wireless Communication Technology for Wireless Sensor Network", 3rd IEEE International

---

Colloquium in Information Science and Technologie, pp. 396-401, October 20-22, 2014, Tetuan-chefchaouen, Morocco.

Asmaa El Gueraa, Anouar Darif, Rachid Saadane and Driss Aboutajdine, "An efficient Transceiver for Vehicular Ad hoc Network Based on IR-UWB", The 2nd IEEE World Conference on Complex Systems, November 10-12, 2014, Agadir, Morocco.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "Energy Consumption Optimization in Real Time Applications for WSN using IR-UWB Technology", IEEE International Conference on Renewable and Sustainable Energy (IRSEC), pp. 379-384, March 7-9, 2013, Ouarzazate, Morocco.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "Exploring mobility of IR-UWB based WSN", IEEE International Conference on Complex Systems (ICCS), pp. 1-5, November 5-6, 2012, Agadir, Morocco.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "A Comparative Study of Medium Access Control Protocols for Impulse-Radio UWB based WSN", The Fifth Workshop On Information Technologies And Communication, December 26-27, 2013, Fez, Morocco.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "Performance Evaluation of Wi-deMac Compared to ALOHA in term of Energy Consumption for IR-UWB based WSN", International Conference on Intelligent Information and Network Technology, November 13-14, 2013, Settat, Morocco.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "Low power consumption based on the physical layer for Wireless Sensors Network", 4th Workshop on Codes, Cryptography and Communication Systems, November 7-8, 2013, Meknes, Morocco.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "IR-UWB : A Promising Wireless Communication Technology for Wireless Sensor Network", International Workshop on Wireless Networks and Mobile Communications Faculty of Sciences Dhar El Mahraz, December 25, 2013, Fez, Morocco.

### **Conférences nationales :**

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "Towards a new buildings fire alarm system architecture using IR-UWB based WSN", 4ème Journées Doctorales en Technologies de l'Information et de la Communication, October 25-27, 2012, Casablanca, Morocco.

Anouar Darif, Rachid Saadane, Driss Aboutajdine, "Exploring Mobility of Impulse Radio Ultra Wide Band based Wireless Sensor Network", 2ème édition des Journées Scientifiques URAC n°29 du LRIT, May 31, 2013, Rabat, Morocco.



---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks", IEEE Communications Magazine, Vol.40, No. 8, pp. 102-114, August 2002.
- [2] S. Sudevalayam, P. Kulkarni, "Energy Harvesting Sensor Nodes : Survey and Implications", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, No. 3, pp. 443-461, september 2011.
- [3] J. P. Lynch, A. Sundararajan, K. H. Law, A. S. Kiremidjian, E. Carryer, "Embedding damage detection algorithms in a wireless sensing unit for operational power efficiency", Smart Materials and Structures, Vol. 13, No. 4, pp. 800-810, April 2004.
- [4] H. Qi, Y. Xu, X. Wang, "Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks", Proceedings of the IEEE, Vol. 91, No. 8, pp. 1172-1183, August 2003.
- [5] Ben L. Titzer et J. Palsberg , "Nonintrusive Precision Instrumentation of Microcontroller Software" , ACM, New York, NY, ETATS-UNIS , Vol. 40, No. 7, pp. 59-68, July 2005.
- [6] H. Karl, A. Willing, "Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks", Book published by Wiley & Sons, 2007.
- [7] I. Vasilescu, K. Kotay, D. Rus, M. Dunbabin, P. Corke, "Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network", In Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems, ACM, pp. 154-165, November 2005.
- [8] W. Schott, A. Gluhak, M. Presser, U. Hunkeler, R. Tafazolli, "e-SENSE Protocol Stack Architecture for Wireless Sensor Networks", In 16th IST on Mobile and Wireless Communications Summit, pp. 1-5, July 2007.
- [9] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarsubramaniam, E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks", IEEE Communications Magazine, pp. 102-114, August 2002.
- [10] K. Akkaya, M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks", Ad hoc networks, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, May 2005.

- 
- [11] N. Abu-Ghazaleh, K. D. Kang, K. Liu, "Towards resilient geographic routing in WSNs", In Proceedings of the 1st ACM international workshop on Quality of service & security in wireless and mobile networks, pp. 71-78, October 2005.
- [12] S. Taruna, K. Jain, G.N. Purohit, "Application Domain of Wireless Sensor Network : A Paradigm in Developed and Developing Countries", International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, No. 2, pp. 611-617, July 2011.
- [13] T. -W. Sung, T. -T. Wu, C. -S. Yang, Y. -M. Huang, "Reliable Data Broadcast For Zigbee Wireless Sensor Networks", International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 504-520, september 2010.
- [14] S. M. Diamond, M. G. Ceruti, "Application of Wireless Sensor Network to Military Information Integration", 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics, vol.1, pp.317-322, June 2007.
- [15] M. P. Durisic, Z. Tafa, G. Dimic, V. Milutinovic, "A survey of military applications of wireless sensor networks", Mediterranean Conference on Embedded Computing, pp.196-199, June 2012.
- [16] H. Chan, A. Perrig, "Security and privacy in sensor networks", Journal of Computer, Vol. 36, No. 10, pp. 103-105, October 2003.
- [17] J. K. Hart, K. Martinez, "Environmental Sensor Networks : A revolution in the earth system science", Earth-Science Reviews, Vol. 78, No. 3, pp. 177-191, Octobe 2006.
- [18] W. S. Jang, W. M. Healyn, "Assessment of Performance Metrics for Use of WSNs in Buildings", International Symposium on Automation and Robotic in Construction, pp. 570-575, September 2009.
- [19] H. Baldus, K. Klabunde, G. Muesch, "Reliable set-up of medical body-sensor networks", In Wireless Sensor Networks , Springer Berlin Heidelberg, pp. 353-363, January 2004.
- [20] C. Kappler, G. Riegel, "A real-world, simple wireless sensor network for monitoring electrical energy consumption", In Wireless Sensor Networks, Springer Berlin Heidelbergpp, pp. 339-352, anuary 2004.
- [21] V. Tsetsos, G. Alyfantis, T. Hasiotis, O. Sekkas, S. Hadjiefthymiades, "Commercial wireless sensor networks : Technical and business issues", In the 2nd International Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, pp. 166-173, January 2005.
- [22] C. Baouche, A. Freitas, M. Misson, "Radio proximity detection in a WSN to localize mobile entities within a confined area", Journal of Communications, Vol. 4, No. 4, pp. 232-240, May 2009.
- [23] S. Khatarkar, R. Kamble, "Wireless Sensor Network MAC Protocol : SMAC & TMAC", Indian Journal of Computer Science and Engineering, Vol. 4, No.4, pp. 304-310, Aug-Sep 2013.

- [24] S. Joshi, A. Kr. Jaiswal, P. Kr. Tyagi, "A Novel Analysis of T-Mac and S-Mac Protocol for Wireless Sensor Networks Using Castalia", *International Journal of Soft Computing and Engineering*, Vol. 2, No. 6, pp. 128-131, January 2013.
- [25] A. El-Hoiydi, J-D. Decotignie, "WiseMAC : an ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks," *Ninth International Symposium on Computers and Communications*, vol.1, pp. 244-251, July 2004.
- [26] J. Polastre, J. Hill, D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", In the Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pp. 95-07, November 2004.
- [27] K. Obraczka, V. Rajendran, J.J. Garcia-Luna-Aceves. "Energy Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks", *Wireless Networks*, Vol. 12, No. 1, pp. 63-78, February 2006.
- [28] V. Rajendran, J. Garcia-Luna-Aceves, K. Obraczka, "Energy-efficient, application-aware medium access for sensor networks", in *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference*, pp. 8-15, November 2005.
- [29] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, G. J. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless sensor network", *IEEE Person. Commun.*, Vol. 7, No. 5, pp. 16-27, October 2000.
- [30] Y. Sun, S. Du, O. Gurwitz, D. B. Johnson, "DW-MAC : A low latency, energy efficient demand-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks" In *Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 53-62, 2008.
- [31] M. I. Brownfield, "Energy-efficient Wireless Sensor Network MAC Protocol", PhD thesis, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, March 2006.
- [32] A. Warriar, J. Min, I. Rhee. "ZMAC : a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 16, No. 3, pp. 511-524, June 2008.
- [33] Y. Z. Zhao, M. Ma, C. Y. Miao, T. N. Nguyen, "An energy-efficient and low-latency MAC protocol with adaptive scheduling for multi-hop wireless sensor networks", *Comput. Commun.*, Vol. 33, pp. 1452-1461, 2010.
- [34] "Sensing Coverage for Randomly Distributed Wireless Sensor Networks in Shadowed Environments", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 556-564, January 2008.
- [35] S. Liu, G. Xing, H. Zhang, J. Wang, J. Huang, M. Sha, L. Huang, "Passive interference measurement in Wireless Sensor Networks", *18th IEEE International Conference on Network Protocols*, pp.52-61, October 2010.
- [36] Y. Zou, K. Chakrabarty, "Sensor deployment and target localization based on virtual forces", *Twenty-Second Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications*, *IEEE Societies*, Vol. 2, pp. 1293-1303, March-April 2003.

- 
- [37] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, M. B. Srivastava, "Energy-aware wireless microsensor networks", *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 19, No. 2, pp. 40-50, 2002.
- [38] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian, E. Cayirci, "Wireless sensor networks : a survey", *Computer Networks*, Vol. 38, no. 4, pp. 393-422, March 2002.
- [39] M. A. Razzaque, S. Dobson, "Energy-Efficient Sensing in Wireless Sensor Networks Using Compressed Sensing", *Sensors*, Vol. 14, No. 2, pp. 2822-2859, February 2014.
- [40] G. J. Pottie, W. J. Kaiser, "Wireless integrated network sensors", *Magazine Communication of the ACM*, Vol. 43, No. 4, pp. 51-58, May 2000.
- [41] Rodoplu, V. et T. H. Meng, "Minimum energy mobile wireless networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 17, No. 8, pp. 1333-1344, August 1999.
- [42] Das, A. K., R. J. Marks, M. El-Sharkawi, P. Arabshahi et A. Gray, "Minimum power broadcast trees for wireless networks : integer programming formulations", In the Twenty-Second Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications, IEEE Societies, Vol. 2, pp. 1001-1010, March-April 2003.
- [43] S. Chong, M. Gaber, S. Krishnaswamy, S. Loke, "Energy-aware data processing techniques for wireless sensor networks : a review", *Transactions on Large-Scale Data- and Knowledge-Centered Systems III, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 6790, pp. 117-137, 2011.
- [44] W. Dengwei, L. Yinghua, Z. Hongxin, S. Che, H. Yunan, "A wireless sensor network based on Bluetooth for telemedicine monitoring system", *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, vol.2, pp. 1361-1364, August 2005.
- [45] X. Carcelle, B. Heile, C. Chatellier, P. Pailler, "Next WSN applications using ZigBee", In *Home Networking*, Springer US, pp. 239-254, 2008.
- [46] A. Lecointre, A. Berthe, D. Dragomirescu, J. Turbert, R. Plana, "Performance evaluation of Impulse Radio Ultra Wide band Wireless Sensor Networks", *IEEE Military Communications Conference*, pp. 1-7, October 2009.
- [47] S. Tilak, N. B. Abu-Ghazaleh, W. B. Heinzelman, "A taxonomy of wireless microsensor network models", *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 6, No. 2, pp. 28-36, April 2002.
- [48] S. K. Singh, M. P. Singh, D. K. Singh, "Applications, Classifications, and Selections of Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks", *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies*, Vol. 1, No. 2, pp. 85-95, 2010.
- [49] V. R. Syrotiuk, B. Li, A. M. Mielke, "Heterogeneous Wireless Sensor Networks", in *Algorithms and Protocols for Wireless Ad hoc and Sensor Networks*, A. Boukerche, John Wiley and Sons, Chapter 2, pp. 21-50, 2008.

- [50] F. Nekoogar, "Ultra-Wideband Communications : Fundamentals and Applications", Prentice Hall, ISBN-13 : 978-0132782234, September 2005.
- [51] R. J. Fontana, "A brief history of UWB communications", *Trans. Microwave Theory and Tech*, Vol. 14, No. 11, pp. 528-547, 1966.
- [52] V. S. Somayazulu, "Multiple access performance in UWB systems using time hopping vs. direct sequence spreading", In *Wireless Communications and Networking Conference*, Vol. 2, pp. 522-525, March 2002.
- [53] H. F. Harmuth, J. D. Lee, "Transmission of Information by Orthogonal Functions", *IEEE Transactions on Systems*, vol. 1, no. 2, pp.188-188, April 1971.
- [54] L. Larson, D. Laney, J. Jamp, "An overview of hardware requirements for uwb systems : interference issues and transceiver design implications", In *Proceedings of the IEEE conference on Military communications*, IEEE Computer Society, Vol. 2, pp. 863-867, October 2003.
- [55] W. H. Gao, L. L. Guo, Z. G. Liang, "A novel wireless personal area network technology : Ultra wide band technology", *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 5, No. 3, pp. 63-69, September 2006.
- [56] R. Scholtz, "Multiple access with time-hopping impulse modulation", In *IEEE Military Communications Conference*, vol. 2, pp. 447-450, October 1993.
- [57] F. Evennou, "Techniques et technologies de localisation avancées pour terminaux mobiles dans les environnements indoor", PhD thesis, UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - Grenoble I, Janvier 2007.
- [58] D. Marchaland, M. Villegas, G. Baudoin, C. Tinella, D. Belot, "System Concepts dedicated to UWB Transmitter", In *Wireless Technology, The European Conference on*, pp. 141-144, October 2005.
- [59] D. Marchaland, M. Villegas, G. Baudoin, C. Tinella, D. Belot, "System Concepts dedicated to UWB Transmitter", *European Microwave Association*, pp. 116-121, June 2006.
- [60] J. Schwoerer, "Etude et implementation d'une couche physique uwb impulsionnelle à bas débit et faible complexité", Ph.D. dissertation, INSA Rennes, January 2006.
- [61] M. Z. Win, R. A. Scholtz, "Impulse radio : how it works", *IEEE Communications Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 36-38, February 1998.
- [62] L. Ismail, Y. Bahreini, "Ultra-wideband pulse modulation system and method", US Patent No 7190722, March 2007.
- [63] A. P. Adsul, S. K. Bodhe, "Performance Comparison of BPSK, PPM and PPV Modulation Based IR-UWB Receiver Using Wide Band LNA", *International Journal of Computer Technology and Applications*, Vol. 3, No. 4, pp. 1532-1537, July-August 2012.

- 
- [64] R. Fisher, R. Kohno, M. MC Laughlin, et al., "DS-UWB physical layer submission to 802.15 Task Group 3a", Document technique IEEE P802.15-04/0137r3, IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), July 2004.
- [65] A.A.M. Saleh, R. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 5, No. 2, pp. 128-137, February 1987.
- [66] S.S.M. Wong, F.C.M. Lau, C.K. Tse, "Propagation characteristics of uwb radio in a high-rise apartment", In IEEE The 8th International Conference on Advanced Communication Technology, Vol. 2, pp. 914-918, February 2006.
- [67] R. M. Cramer, R. A. Scholtz, M. Z. Win, "Evaluation of an ultra-wide-band propagation channel", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 50, No. 5, pp. 561-570, May 2002.
- [68] S. Venkatesh, J. Ibrahim, R.M. Buehrer, "A new 2-cluster model for indoor uwb channel measurements", In IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 1, pp. 946-949, June 2004.
- [69] A.F. Molisch, J.R. Foerster, M. Pendergrass, "Channel models for ultrawideband personal area networks", IEEE Wireless Communications, Vol. 10, No. 6, pp. 14-21, December 2003.
- [70] S.S. Ghassemzadeh, R. Jana, C.W. Rice, W. Turin, V. Tarokh, "Measurement and Modeling of an Ultra-Wide Bandwidth Indoor Channel", IEEE Transactions on Communications, Vol. 52, no. 10, pp. 1786-1796, October 2004.
- [71] A. Saleh, R. Valenzuela, "A Statistical Model for Indoor Multi-path Propagation", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 5, no.2, pp.128-137, February 1987.
- [72] T. S. Rappaport, S. Y. Seidel, K. Takamizawa, "Statistical channel impulse response models for factory and open plan building radio communication system design", IEEE Transactions on Communications vol. 39, No. 5, pp.794-806, 1991.
- [73] Z. Jianliang, M.J. Lee, "Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality : a discussion on a potential low power, low bit rate standard", IEEE Communications Magazine, Vol.42, No.6, pp. 140-146, June 2004.
- [74] A. F.Molisch, J.R. Foerster, M. Pendergrass, "Channel models for ultrawideband personal area networks", IEEE Wireless Communications, Vol.10, No.6, pp.14-21, December 2003.
- [75] Z. Sahinoglu, S. Gezici, I. Guvenc, "Ultra-Wideband Positioning Systems : Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols", Cambridge : Cambridge University Press, ISBN : 0521873096, 2008.

- [76] M.Z. Win, R.A Scholtz, "Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications", *IEEE Transactions on Communications*, Vol.48, No.4, pp. 679-689, April 2000.
- [77] J. Schwoerer, "Etude et implementation d'une couche physique uwb impulsionnelle à bas débit et faible complexité", Ph.D. dissertation, INSA Rennes, Janvier 2006.
- [78] G. Durisi, S. Benedetto, "Performance of Coherent and Non-coherent Receivers for UWB Communications", *IEEE Communications Society*, pp. 3429-3433, June 2004.
- [79] D.C. Daly, A.P.Chandrakasan, "An Energy-Efficient OOK Transceiver for Wireless Sensor Networks", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.42, No.5, pp. 1003-1011, May 2007.
- [80] B. Miscopain, "Systèmes uwb impulsionnels noncohérents pour les réseaux de capteurs : coexistence et coopération", Ph.D. dissertation, INSA Lyon, Mai 2010.
- [81] F.S. Lee, ; A.P. Chandrakasan, "A 2.5 nJ/bit 0.65 V Pulsed UWB Receiver in 90 nm CMOS", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.42, No.12, pp. 2851-2859, December 2007. 2007.
- [82] D.D. Wentzloff, F.S. Lee, D.C. Daly, M. Bhardwaj, P.P. Mercier, A.P. Chandrakasan, "Energy Efficient Pulsed-UWB CMOS Circuits and Systems", *IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, pp. 282-287, September 2007.
- [83] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Energy capture vs. correlator resources in ultrawide bandwidth indoor wireless communications channels", in *Proceedings MILCOM 97*, Vol. 3, pp. 1277-1281, November 1997.
- [84] K. Witrisal, G. Leus, G. Janssen, M. Pausini, F. Troesch, T. Zasowski, J. Romme, "Noncoherent ultra-wideband systems", *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 26, No. 4, pp. 48-66, July 2009.
- [85] E. Karapistoli, F. N. Pavlidou, I. Gragopoulos, I. Tsetsinas, "An overview of the IEEE 802.15. 4a standard", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 48, No. 1, pp. 47-53, January 2010.
- [86] IEEE Std 802.15.4-2003, "IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 15.4 : Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)", October 2003.
- [87] J. S. Lee, "Performance evaluation of IEEE 802.15. 4 for low-rate wireless personal area networks", *IEEE transactions on Consumer electronics*, , Vol. 52, No. 3, pp. 742-749, August 2006.
- [88] Z. Ahmadian, L. Lampe, "Performance Analysis of the IEEE 802.15.4a UWB System", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 57, No. 5, pp. 1474-1485, May 2009.

- 
- [89] C.E. Shannon, "Communication In The Presence Of Noise", Proceedings of the IEEE , Vol. 86, No. 2, pp. 447-457, February 1998.
- [90] D. Cassioli, M.Z. Win, A. F.Molisch, "A statistical model for the UWB indoor channel", IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, Vol. 2, pp. 1159-1163, May 2001.
- [91] R. J. Fontana, S. J. Gunderson, "Ultra-Wideband Precision Asset Location System", in IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, pp. 147-150, May 2002.
- [92] F. Kharrat-Kammoun, C.J. Le Martret, P. Ciblat, "Performance analysis of IR-UWB in a multi-user environment", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, No. 11, pp. 5552-5563, November 2009.
- [93] J. Rousselot, J.-D. Decotignie, "A High-Precision Ultra Wideband Impulse Radio Physical Layer Model for Network Simulation", Proceedings of the Second International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, March 2009.
- [94] A. Darif, R. Saadane, D. Aboutajdine, "Performance Evaluation of IR-UWB Compared to Zigbee in Real time Applications for Wireless Sensor Networks", Journal of Convergence Information Technology , Vol. 8, No. 15, pp. 1-12, October 2013.
- [95] A. Darif, R. Saadane, D. Aboutajdine, "An Efficient Short Range Wireless Communication Technology for Wireless Sensor Network", 3rd International IEEE Colloquium on Information Science and Technologie, October 2014.
- [96] I. Demirkol, C. Ersoy, F. Fathi Alagoz, "MAC Protocols for Wireless Sensor Networks : A Survey", IEEE Communications magazine, Vol.44, No. 4, pp. 115-121, April 2006.
- [97] R. Lin, Z. Wang, Y. Li, Y. Sun, "A scalable energy efficient medium access control protocol for wireless sensor networks", In Advances in Intelligent Computing, Springer Berlin Heidelberg, pp. 568-577, 2005.
- [98] M. Ulema, "Wireless sensor networks : architectures, protocols, and management", IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Vol. 1, pp. 1542-1201, April 2004.
- [99] T. Watteyne, "Energy-Efficient Self-Organization for Wireless Sensor Networks", Ph.D. dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA-Lyon), November 2008.
- [100] N. Timmons and W. Scanlon, "Analysis of the performance of ieee 802.15.4 for medical sensor body area networking", In the First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, pp. 16-24, October 2004.

- [101] K. Yedavalli, B. Krishnamachari, "Enhancement of the IEEE 802.15.4 MAC protocol for scalable data collection in dense sensor networks", 6th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks and Workshops, pp.152-161, April 2008.
- [102] M. Brownfield, K. Mehrjoo, A. Fayed, I. Davis, "Wireless sensor network Energy-adaptive mac protocol", In the 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Vol. 2, pp. 778-782, January 2006.
- [103] V. Rajendran, K. Obraczka, J. Garcia-Luna-Aceves, "Energy-efficient, collision free medium access control for wireless sensor networks", *Wireless Networks*, Vol. 12, No. 1, pp. 63-78, February 2006.
- [104] L. v. Hoesel, P. Havinga, "A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks", 1st International Workshop on Networked Sensing Systems, June 2004.
- [105] D. Incel, S. Dulman, P. Jansen, "Multi-channel support for dense wireless sensor networking", in *Proceedings of the First European Conference on Smart Sensing and Context (EuroSSC)*, pp. 1-14, October 2006.
- [106] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks", in the 21st Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), Vol. 3, pp. 1567-1576, June 2002.
- [107] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol. 12, No. 3, pp. 493-506, June 2004.
- [108] G. Lu, B. Krishnamachari, C. Raghavendra, "An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in sensor networks", *Journal of Wireless Communications & Mobile Computing*, Vol. 7, No. 7, pp. 863-875, September 2007.
- [109] W. L. Tan, W. C. Lau, O. Yue, "Performance analysis of an adaptive, energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks", *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol. 72, No. 4, pp. 504-514, April 2012.
- [110] Y. Z. Zhao, C. Y. Miao, M. Ma, "An Energy-Efficient Self-Adaptive Duty Cycle MAC Protocol for Traffic-Dynamic Wireless Sensor Networks", *Wireless Personal Communications*, Vol. 68, No. 4, pp. 1287-1315, February 2013.
- [111] A. El-Hoiydi, "Aloha with Preamble Sampling for Sporadic Traffic in Ad Hoc Wireless Sensor Networks", in *IEEE International Conference on Communication*, Vol. 5, pp. 3418-3423, April 2002.
- [112] J. Hill, D. Culler, "Mica : a wireless platform for deeply embedded networks", *IEEE Micro*, Vol. 22, No. 6, pp. 12-24, November 2002.

- 
- [113] A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie, "WiseMAC : An ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks", *Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks, Lecture Notes in Computer Science Vol. 3121*, pp. 18-31, 2004.
- [114] A. Bachir, D. Barthel, M. Heusse, A. Duda, "Micro-Frame Preamble MAC for Multihop Wireless Sensor Networks", *IEEE International Conference on Communications, Vol.7*, pp.3365-370, June 2006.
- [115] S. Mahlknecht, M. Boeck, "CSMA-MPS : A minimum preamble sampling MAC protocol for low power wireless sensor networks", in *IEEE Int. Workshop on Factory Communication Systems, Vienna, Austria*, pp. 73-80, September 2004.
- [116] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, R. Han, "X-MAC : A short preamble mac protocol for duty-cycled wireless networks", *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 307-320, November 2006.
- [117] R. Merz, "Interference management in impulse-radio ultra-wide band networks", Ph.D. dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, July 2008.
- [118] F. Cuomo, C. Martello, A. Baiocchi, and F. Capriotti, "Radio Resource sharing for ad hoc networking with UWB", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No.9*, pp. 1722-1732, September 2006.
- [119] M. Win and R. Scholtz, "Ultra-Wide Bandwidth Time-Hopping Spread-Spectrum Impulse Radio for Wireless Multiple-Access Communications", *IEEE Transactions on Communications, Vol. 48, No. 4*, pp. 679-689, April 2000.
- [120] E. Karapistolia, I. Gragopoulos, I. Tsetsinas, F.-N. Pavlidou, "A MAC protocol for low-rate UWB wireless sensor networks using directional antennas", *Journal of Computer Networks, Vol. 53, No. 7*, pp. 961-972, May 2009.
- [121] R. Negi, A. Rajeswaran, "Capacity of power constrained ad-hoc networks", In the *Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Vol. 1*, March 2004.
- [122] M. Franceschetti, D. Migliore, P. Minero, "The Capacity of Wireless Networks : Information-Theoretic and Physical Limits", *IEEE Transactions on Information Theory, Vol.55, No.8*, pp.341-3424, August 2009.
- [123] M.-G. Di Benedetto, L. De Nardis, M. Junk, G. Giancola, "UWB : Uncoordinated, Wireless, Baseborn medium access for UWB communication networks", *Mobile Networks and applications, Springer editions, Vol. 10, No. 5*, pp. 663-674, October 2005.
- [124] H. Anouar, C. Bonnet, "A Self-Balanced Receiver-Oriented MAC Protocol for Multiple Channels Multihop Ad-Hoc Networks", In the *61st Semiannual IEEE Vehicular Technology Conference, Vol. 3*, pp. 1514-1518, May-June 2005.

- [125] S. Almeras, G. Guibé, C. Le Martret, "An Efficient Distributed Ad Hoc MAC Protocol for UWB Time-Hopping Code Impulse Radio", in IEEE Military Communications Conference, vol. 2, pp. 1263-1269, October 2005.
- [126] F. Talucci, M. Gerla, "MACA-BI (MACA by Invitation) : A Wireless MAC Protocol for High Speed Ad Hoc Networking", IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications Record, 1997. Conference Record, Vol. 2, pp. 913-917, October 1997.
- [127] S. Kolenchery, J. Townsend, J. Freebersyser, "A Novel Impulse Radio Network for Tactical Military Wireless Communications", IEEE Military Communications Conference, vol. 1, pp. 59-65, October 1998.
- [128] N. J. August, H.-J. Lee, and D. S. Ha, "Enabling distributed medium access control for impulse-based ultrawideband radios", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 56, no. 3, pp. 1064-1075, May 2007.
- [129] N. August, "Medium access control in impulse-based ultrawideband ad hoc and sensor networks", Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [130] F. A. Tobagi, L. Kleinrock, "Packet Switching in Radio Channels : Part II-The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy Tone Solution", IEEE Transactions on Communications, Vol. 23, No. 12, pp 1417- 1433, 1975.
- [131] R. Merz, "Interference management in impulse-radio ultra-wide band networks", Ph.D. dissertation, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (CH), 2008.
- [132] J.-Y. Le Boudec, R. Merz, B. Radunovic, J. Widmer, "DCC-MAC : a decentralized MAC protocol for 802.15.4a-like UWB mobile ad-hoc networks based on dynamic channel coding", First International Conference on Broadband Networks, pp. 396-405, October 2004.
- [133] Y. Qi, H. bang Li, S. Hara, and R. Kohno, "Clear channel assessment (cca) with multiplexed preamble symbols for impulse ultra-wideband (uwb) communications", Ultra-Wideband, The 2006 IEEE 2006 International Conference on, pp. 675-680, September 2006.
- [134] N. Abramson, "The aloha system : Another alternative for computer communications", In Fall Joint Computer Conference, ACM, USA, pp. 281-285, April 1970.
- [135] F. Baccelli, B. Baszczyszyn, P. Mühlethaler, "An Aloha Protocol for Multihop Mobile Wireless Networks", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 52, No. 2, pp. 421-436, February 2006.
- [136] M. T. B. Richard, D. Rubenstein, "An Analysis of Generalized Slotted-Aloha Protocols", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 17, No. 3, pp. 936-949, June 2009.

- 
- [137] J. Ryckaert, G. Van der Plas, V. De Heyn, C. Desset, B. Van Poucke, J. Craninckx, "A 0.65-to-1.4 nJ/Burst 3-to-10 GHz UWB All-Digital TX in 90 nm CMOS for IEEE 802.15.4a", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.42, No.12, pp. 2860-2869, December 2007.
- [138] J. Rousselot, A. El-Hoiydi, and J.-D. Decotignie, "WideMac : a low power and routing friendly MAC protocol for Ultra Wideband sensor networks", IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Vol. 3, pp. 105-108, September 2008.
- [139] J. Rousselot, "Ultra Low Power Communication Protocols for UWB Impulse Radio Wireless Sensor Networks", Thèse N4720 EPFL Faculté Informatique et Communications, July 2010.
- [140] J. Rousselot, J.-D. Decotignie, "A High-Precision Ultra Wideband Impulse Radio Physical Layer Model for Network Simulation", Proceedings of the Second International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, pp. 79-86, March 2009.
- [141] A. El-Hoiydi, "Energy Efficient Medium Access Control for Wireless Sensor Networks", PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), 2005.
- [142] Y. Sun, O. Gurewitz, D. B. Johnson, "RI-MAC : a receiver- initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks", Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems, pp. 1-14, November 2008.
- [143] G. P. Halkes, K. G. Langendoen, "Crankshaft : An Energy-Efficient MAC-Protocol for Dense Wireless Sensor Networks", Wireless Sensor Networks, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4373, pp. 228-244, 2007.
- [144] IEEE Computer Society, "IEEE P802.15 Wireless Personal Area Networks-MedWiN MAC and Security Proposal Documentation", Technical report, September 2009, <http://mentor.ieee.org/802.15/dcn/09/15-09-0327-01-0006-medwin-mac-and-security-proposal-documentation.pdf>.
- [145] IEEE Computer Society, "IEEE 802.15.4 WPAN Low Data Rate Alternative PHY Layer", <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>.
- [146] A. Darif, R. Saadane, D. Aboutajdine, "Performance Evaluation of WideMac Compared to ALOHA in term of Energy Consumption for IR-UWB based WSN", Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence, Vol. 6, No. 1, pp. 54-58, February 2014.
- [147] NS-2 official website, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (Accès Mars 2012)
- [148] NS-3 official website, <http://www.nsnam.org/> (Accès Mars 2012)
- [149] OPNET official website, <http://www.opnet.com> (Accès Mars 2012)
- [150] OMNET++ official website, <http://www.omnetpp.org> (Accès Mars 2012)

- [151] A. Köpke, M. Swigulski, K. Wessel, D. Willkomm, P.T. Klein Haneveld, T.E.V. Parker, O.W. Visser, H.S. Lichte, S. Valentin, "Simulating Wireless and Mobile Networks in OMNeT++ : The MiXiM Vision", Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications networks and systems, p. 1-8, 2008.
- [152] R. A. Scholtz, D. M. Pozar, W. Namgoong, "Ultra-Wideband Radio", EURASIP Journal on Applied Signal Processing, Vol. 3, pp. 252-272, 2005.
- [153] A. Darif, R. Saadane, D. Aboutajdine, "One Way Direction Communication Synchronization for WideMac Protocol in IR-UWB based WSN", International Journal of Computer Networks and Communications Security, Vol. 1, No. 5, pp. 173-179, October 2013.
- [154] A. Darif, R. Saadane, D. Aboutajdine, "No Communication Nodes Synchronization for a Low Power Consumption MAC Protocol in WSN based on IR-UWB", Journal of Communications Software and Systems, Vol. 10, No. 2, pp.90-98, June 2014.
- [155] A. Darif, R. Saadane, D. Aboutajdine, "Synchronized WideMac (SWIMAC) : A New Efficient MAC Protocol for IR-UWB Based WSN", European Journal of Scientific Research, Vol. 106, No. 1, pp. 52-75, 2013.