

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira de Bejaïa

Faculté des Sciences Exactes

Département Informatique



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

Mémoire De Fin De Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Informatique

Option : Intelligence Artificielle

Thème

Evaluation de performances des Réseaux de Capteurs sans fil IEEE 802.15.4

Réalisé par :

M^{elle} HAMICHE Sylia.

M^{elle} BELHOUANE Nawal.

Évalué par :

Promotrice M^{me} BACHIRI Lina M.C.B U.A.M Béjaïa

Examinatrice M^{me} KHOULALENE Nadjet M.C.B U.A.M Béjaïa

Examinatrice M^{me} SOUADIH Rebiha M.A.A U.A.M Béjaïa

Promotion : 2019/2020

Remerciements

Ce travail n'aurait pas pu être accompli sans l'aide précieuse et les conseils encourageants de nombreuses personnes.

Pour cela, Nous rendons grâce au Seigneur tout puissant, à qui revient le mérite de toute reconnaissance.

Nos plus profonds remerciements vont à nos parents. Tout au long de notre cursus, ils nous ont toujours soutenu, encouragé et aidé. Ils ont su nous donner toutes les chances pour réussir. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts ainsi

que l'expression de notre plus affectueuse gratitude.

Nous exprimons Notre reconnaissances à notre Promotrice Mme L. Bachiri, pour son envie de toujours vouloir transmettre ses connaissances à ses étudiants.

Aussi à tous les enseignants et employés du département Informatique à qui on doit notre avancement.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche, en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs connaissances.

Nos remerciements à toute notre famille et à nos amies et camarades de promotion pour les bons et les mauvais moments passés ensemble Un grand Merci à tous ceux que nous avons omis de citer ici, et qui ont contribué d'une façon ou d'une autre, dans ce travail.

Merci à tous et à toutes.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents,

A mes frères et sœurs,

A toute la famille,

A mes amies et collègues, et tous ceux qui m'ont aidé ;

A ma binôme Nawal et sa famille.

HAMICHE Syla

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents,

A mes frères et sœurs,

A toute la famille,

A mes amies et collègues, et tous ceux qui m'ont aidé ;

A ma binôme Nawal et sa famille.

A ma binôme Syla et sa famille.

BELHOUANE Nawal

Table des matières

Introduction générale	1
1 Généralités sur les réseaux de capteurs	4
1.1 Introduction	4
1.2 Définition	4
1.2.1 Un capteur	4
1.2.2 Les sous-systèmes d'un nœud	5
1.2.2.1 Sous-système de calcul	5
1.2.2.2 sous-système de communication	5
1.2.2.3 sous-système de capteurs	5
1.2.2.4 sous-système de génération de courant	5
1.2.3 Architecture d'un nœud	6
1.2.4 Capteur intelligent	7
1.2.5 RCSF ou WSN (Wireless Sensor Network)	7
1.3 Historique des réseaux de capteurs sans fil	8
1.4 Classification des réseaux sans fil	9
1.4.1 Les réseaux personnels sans fil (WPAN)	9
1.4.2 Les réseaux locaux sans fil (WLAN)	10
1.4.3 Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN).....	10
1.4.4 Les réseaux étendus (WWAN).....	10
1.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs	10
1.6 Applications	11
1.7 Architecture de communication dans les réseaux de capteurs	12
1.7.1 Rôles des couches	12
1.8 Conclusion	12
2 standardisation	13

2.1 Introduction.....	13
2.2 Standard IEEE 802.15.4	14
2.3 Architecture	14
2.4 La couche physique dans l'IEEE802.15.4	16
2.5 La couche MAC dans IEEE 802.15	17
2.5.1 Les trame dans IEEE 802.15.4	18
2.5.2 Modes de fonctionnement dans IEEE 802.15.4	18
2.5.3 Transfert de données dans IEEE 802.15.4	19
2.5.3.1 Transmission de données des fils vers le coordinateur (transmission directe) .	20
2.5.3.2 Transmission de données du coordinateur vers ses fils (indirecte)	20
2.5.3.3 Transmission de données Pair-à-pair	20
2.5.4 Définition de la super trame dans IEEE 802.15.4	20
2.5.5 Méthode d'accès au canal	22
2.6 Limite dans la norme	25
2.6.1 Topologies	25
2.7 ZigBee	26
2.7.1 Adressage	26
2.8 Evolution de la norme IEEE 802.15.4	27
2.9 Synthèse sur les travaux existants	28
2.9.1 Modèles analytiques existants	29
2.9.1.1 Modèle de G. Bianchi pour la norme IEEE 802.11	29
2.9.1.2 Modèles analytiques existants pour la norme IEEE 802.15.4	29
2.10 Conclusion	31
3 Modélisation et évaluation de performance du mécanisme CSMA/CA à fente IEEE802.15.4.....	32

3.1 Introduction	32
3.2 Modélisation de la fonction CSMA/CA non fendu	32
3.2.1 Hypothèse de modèle	32
3.2.2 Probabilités de modèle	32
3.2.3 Paramètre utilisé dans le modèle	32
3.3 Modèle de chaine de Markov à temps discret	33
3.3.1 Probabilités de transition	35
3.3.2 Probabilités stationnaires	35
3.4 Performances Métriques	37
3.4.1 Modèle de fiabilité	37
3.4.2 Débit normalisé	37
3.4.3 Consommation d'énergie	38
3.5 Résultats numériques	38
3.6 Conclusion	41
Conclusion générale	42

Table des figures

Fig1.1 Exemple de capteur sans fil	5
Fig1.2 Architecture générale d'un capteur	6
Fig1.3 Exemple de capteur intelligent	7
Fig1.4 Réseaux de capteurs	7
Fig1.5 Classification des réseaux sans fil selon la portée	9
Fig1.6 Applications des réseaux de capteurs	11
Fig1.7 Modèle en couches du réseau de capteurs sans fil	12
Fig2.1 Topologies supportées dans IEEE 802.15.4	15
Fig2.2 Structure de la supertrame dans IEEE 802.15.4	18
Fig2.3 Collision de Beacon directes et indirectes	19
Fig2.4 Les modes d'accès au support	22
Fig2.5 CSMA/CA Slotted et Unslotted dans IEEE 802.15.4	24
Fig2.6 L'incoming et l'outgoing supertrame dans IEEE 802.15.4	25
Fig3.1 Chaîne de Markov de IEEE 802.15.4CSMA/CA	34
Fig3.2 Probabilité d'échec des transmission	39
Fig3.3 Débit normalisé par rapport à la taille du réseau	39
Fig3.4 Consommation d'énergie par rapport à la taille du réseau	40
Fig3.5 Consommation d'énergie contre BER	40
Fig3.6 Fiabilité contre BER	41

Liste des tableaux

Tab 1.1 Les trois générations des nœuds de capteurs	9
Tab 2.1 Récapitulatif de la couche physique dans IEEE 802.15.4	17
Tab 2.2 Les amendements IEE 802.15.4	27
Tab 2.3 Les principaux travaux existants sur l'évaluation de performance du 802.15.4	28
Tab 3.1 Notation probabilistes utilisées pour la modélisation	32
Tab 3.2 Notation paramétrique utilisé pour la modélisation	33

Liste des abbreviations

BER	Bit Error Rate
BE	Backoff Exponent
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CSMA /CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CFP	Contention Free Period
CW	Contention Window
GTS	Global Telecommunication System
ED	Energie Detection
FFD	Full-Function Devices
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
LAN	Local Area Network
LQI	Link Quality Indication
MAC	Medium Acces Control
MAN	Metropolitan Area Network
O-QPSK	Offest Quadrature Phase-Shift Keying
OSI	Organisation internationale de normalisation
PSSS	Parallel Sequence Spread Spectrum
RAM	Random Access Memory
RCSF	Réseau de Capteurs Sans Fil
RFC	Requests For Comments
RFD	Reduced-Function Devices

RPL	Reverse Polish Lisp
UWB	Ultra Wide Band
WPAN	Wireless Personal Area Network
QoS	Quality of Service .
ZC	ZigBee Coordinateur
ZED	ZigBee End Device
ZR	ZigBee Router

Introduction Générale

Toujours dans le but de faciliter la vie et de faire éliminer les difficultés autour de l'être humain, plusieurs technologies sont apparues pour garantir ces besoins, l'une de ces technologies est les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) qui constituent un des domaines les plus actifs pour la recherche, car il s'offrent des solutions économiquement intéressantes et facilement déplorables à la surveillance à distance et au traitement des données dans les environnements hostiles. Un réseau de capteurs sans fil est un ensemble de capteurs autonomes à faible coût, interconnectés par un réseau de communications sans fil, capables d'effectuer des mesures sur l'environnement pour construire une vue globale de la région contrôlée. Son but est la collecte d'un ensemble de grandeurs environnementales, physiques ou physiologiques entourant ces capteurs, telles que la température, l'humidité, glycémie, ou tension, etc., afin de les acheminer vers des centres de contrôle.

Ces dernières années, une grande diversité de standards de communication suit l'évolution technologique. Ainsi, dans le but d'être en phase à l'égard de ces progrès, l'organisme Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) a été fondue en février 1980. Il a eu comme tâche de standardiser les couches basses des réseaux locaux et métropolitains par le biais de liaisons filaires ou sans fil. Ce groupe a produit des normes incontournables, telles que, la norme 802.11 [65] (Wifi), la norme 802.3 [10] (Ethernet), les normes 802.15.1 [60] et 802.15.3 [38] (Bluetooth) et 802.15.4 [2](Zigbee).

Pour les RCSFs, la technologie la plus adaptée est le ZigBee. Cette dernière est basée sur la norme IEEE 802.15.4 [2] qui définit la couche Physique et la sous couche MAC.

Ces réseaux ont un spectre très large en terme d'applications [12], chacune ayant des attentes différentes en terme de performances, ce qui implique des contraintes très différentes en terme de réactivité (latence tolérée), d'intensité de trafic, de sécurité, de densité etc. Le dénominateur commun entre toutes ces applications est la nécessité d'avoir une bonne fiabilité tout en minimisant les coûts énergétiques et maximisant la durée de vie du réseau.

Sachant que dans la plupart de ces applications les nœuds n'auront pas une quantité inépuisable d'énergie, ils seront dans la majorité des cas alimentés sur batterie ou équipés de modules de récupération d'énergie (vibration, lumière, chaleur ...). Néanmoins la quantité d'énergie récupérée ne sera pas suffisante et de ce fait des efforts doivent être faits au niveau protocolaire afin d'économiser cette ressource [13].

L'économie d'énergie sera donc l'enjeu le plus important pour l'émergence et la popularisation de cette technologie [14].

L'apparition de ces réseaux a changé la manière de penser les réseaux: l'objectif principal n'est plus de maximiser le débit, mais de maximiser la durée de vie du réseau grâce à des protocoles capables de fonctionner avec de faibles consommations énergétiques et de calcul tout en restant fiables.

Afin de prendre en compte cette contrainte, il faut adapter les protocoles existants ou en développer de nouveaux. Dans les réseaux de capteurs le design des protocoles est intimement lié aux contraintes applicatives [15]. Les applications pour ce genre de réseaux sont tellement nombreuses qu'il faudra en tenir compte dans la conception de ces protocoles et la couche MAC aura un impact des plus importants. Etant chargée de l'accès au canal, elle aura pour

rôle de contrôler le module radio, et donc d'en réduire au maximum l'usage, puisqu'il représente l'une des principales sources de dépense énergétique [16, 17].

La couche MAC dans un réseau de capteurs devra donc être développée dans l'objectif de réduire au maximum le coût énergétique. Une couche MAC idéale, adaptée à toutes les applications citées ci-dessus, sera difficile à réaliser. Ainsi il faudra faire des compromis sur les performances que peuvent offrir ce genre de réseaux (réactivité, délais, débit, durée de vie, etc.).

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

- Les collisions qui surviennent lorsque deux stations ou plus, se trouvant à portée radio les unes des autres, émettent des paquets au même moment, impliquant la perte des paquets et leur réémission.

- L'over hearing qui peut être défini comme la réception par les nœuds de paquets ne leur étant pas destinés.

- L'overhead représenté par la quantité de trafic de contrôle échangé dans le réseau.

- L'écoute passive (idle listening) qui représente le temps où un nœud écoute le canal sans qu'il y ait de paquet à son adresse.

- L'over-emitting que l'on peut définir comme étant l'émission de paquets vers un nœud ayant sa radio éteinte.

Le standard IEEE 802.15.4, son fonctionnement et les principales problématiques liées à la couche MAC proposée et une bref description de la norme ZigBee. Le standard propose entre autres le mode Beacon permettant de faire de l'économie d'énergie en permettant aux nœuds de ne garder la radio allumée que durant le temps nécessaire à leurs communications. Ce mode introduit néanmoins son slot de problèmes. En effet nous avons pu constater que la couche MAC du standard IEEE 802.15.4 ne propose aucun mécanisme pour se prémunir des interférences entre les différents coordinateurs appartenant à un même réseau, problème très contraignant sachant que tout le fonctionnement du réseau repose sur la bonne réception des trames Beacons qu'envoient les coordinateurs. Nous avons également montré que le standard laisse ouverte la construction de topologies et ne résout pas les problèmes liés à la méthode d'accès.

La norme IEEE 802.15.4 a défini deux modes d'accès: le mode balise utilisant des mécanismes d'accès aux canaux fendus CSMA / CA ou Aloha fendus et le mode non balise utilisant des mécanismes d'accès aux canaux CSMA / CA non fendus ou Aloha non fendus. Nous nous concentrons sur le mode non balise en utilisant CSMA / CA fendu.

L'évaluation de performances peut être réalisée de deux manières. Soit à l'aide d'un outil de simulation, soit en utilisant une modélisation analytique. La simulation permet d'évaluer des scénarios complexes mais le coût en développement et en ressources de calcul est très onéreux. De plus, il n'existe pas de simulateurs de réseaux radio en environnement réel [51]. La modélisation analytique a l'avantage d'offrir un temps de calcul faible et demande moins de développement informatique. De plus, les résultats sont plus proches de la réalité. Néanmoins, un modèle analytique est toujours soumis à certaines hypothèses simplificatrices. L'intérêt de l'application des méthodes analytiques est qu'elle permet de bien comprendre quelles sont les lois internes de fonctionnement du système.

Dans ce mémoire nous évaluons les performances du mécanisme du CSMA / CA alloué IEEE 802.15.4 dans des conditions de canal d'évanouissement et de trafic saturé. Pour ce faire, nous proposons une modélisation analytique à l'aide d'une chaîne de Markov. Sur la

base de ce modèle de chaîne de Markov, nous calculons la fiabilité, la consommation d'énergie, le délai moyen et le débit.

Ce mémoire, est composé de quatre chapitres :

Dans le chapitre 1, nous présenterons les généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, leurs caractéristiques et domaines d'application. Par la suite, nous allons présenter les applications industrielles en mettant l'accent sur leurs exigences et défis. Dans le chapitre 2, nous présenterons le standard IEEE 802.15.4, ainsi que les principales problématiques posées par la couche MAC proposée et une bref description de la norme ZigBee. Le chapitre 3, présente notre contribution, à savoir un nouveau modèle analytique pour l'analyse des performances du CSMA / CA alloué IEEE 802.15.4 dans des conditions de canal d'évanouissement et de trafic saturé.

Enfin, notre mémoire s'achèvera par une conclusion générale résumant les grands points qui ont été abordés ainsi que les perspectives dégagées.

1. Introduction

Depuis leur création, les réseaux de communication sans fil ont connu un succès sans cesse croissant au sein des communautés scientifiques et industrielles. Grâce à ses divers avantages, cette technologie a pu s'instaurer comme acteur incontournable dans les architectures réseaux actuelles. De plus, dans la vie courante, l'utilisation des capteurs sans fil est en demande croissante pour la supervision et la sécurité. Les industries proposent alors des capteurs sans fil qui peuvent renseigner l'utilisateur sur plusieurs données. Ces capteurs peuvent être reliés formant ainsi un réseau sans fil se basant sur des protocoles pour se communiquer et proposer des programmes et des réseaux embarqués.

Les réseaux de capteurs sont considérés par nature comme étant des réseaux à forte densité, dépourvus d'infrastructure dans la majorité des cas et utilisant, de la même manière que les réseaux Ad Hoc, les nœuds formant le réseau comme relais dans le but d'acheminer leurs paquets vers destination. Les réseaux de capteurs sont souvent assimilés aux réseaux Ad Hoc. Nous pouvons dire d'une manière plus précise que les réseaux de capteurs sont des réseaux Ad Hoc mais plus fortement contraints. Ces deux types de réseaux présentent les mêmes contraintes liées à l'absence d'infrastructure, l'obligation d'économiser l'énergie ainsi que le non fiabilité des liens radio. Cependant ces contraintes sont amplifiées dans les réseaux de capteurs à cause d'un côté de la taille des batteries et d'un autre côté des capacités limitées en terme de mémoire et de calculs.

1.2 Définitions

1.2.1. Capteur

Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique observée (température, pression, humidité, etc.) en une grandeur utilisable (intensité électrique, position d'un flotteur) [1]. Pour cela, il possède au moins un transducteur dont le rôle est de convertir une grandeur physique en une autre.

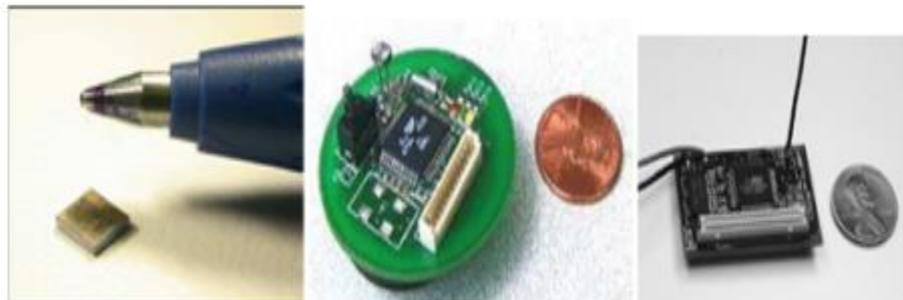


Fig. 1.1 – Exemple de capteur sans fil.

Le thème « réseaux de capteurs » n'est pas d'inventer de nouveaux capteurs mais de découvrir de nouveaux modèles de communication, leurs limites et leurs performances. La durée de vie des capteurs est limitée par la durée de vie de leur batterie.

1.2.2 Les sous-systèmes d'un nœud

Un réseau de capteurs est un réseau informatique composé de nœuds appelés aussi motes, généralement un mote est composé d'un microprocesseur, RAM, interface radio (pour la communication avec les voisins), micro-capteurs capables de collecter et de traiter les informations provenant de l'environnement et une source d'énergie. Chaque nœud du réseau de capteurs est composé de quatre sous-systèmes :

1.2.2.1 Sous système de calcul

Il comprend un processeur associé généralement à une petite unité de stockage et fonctionne à l'aide de système d'exploitation TinyOS spécial pour les micros capteurs. Ce sous-système est chargé d'exécuter les protocoles de communication permettant de faire collaborer le nœud avec les autres nœuds du réseau.

1.2.2.2 Sous système de communication

Il est considéré comme un système radio à courte portée et peut fonctionner en quatre modes : Transmit, Receive, Idle, Sleep.

1.2.2.3 Sous système de capteurs

C'est l'ensemble de capteurs et d'actionneurs (détecteurs) qui relie le nœud au monde extérieur.

1.2.2.4 Sous système de génération de courant

On veut ici augmenter au maximum la durée de vie de la batterie.

1.2.3 Architecture d'un nœud

Tous les capteurs respectent globalement la même architecture basée sur un noyau central autour duquel s'articulent les différentes interfaces d'entrée sortie, de communication et d'alimentation.

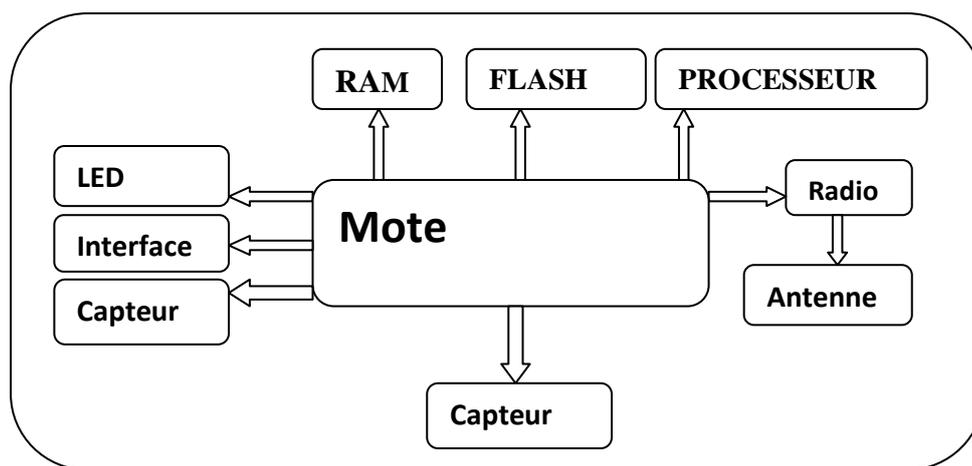


Fig. 1.2 Architecture générale d'un capteur

On peut voir sur la figure **Fig. 1.2** les différents composants qui constituent un capteur, pour être plus précis chaque groupe de composants possède son propre rôle:

- **Mote, processeur, RAM et Flash** : On appelle généralement mote la carte physique utilisant le système d'exploitation pour fonctionner. Celle-ci a pour cœur le bloc constitué du processeur et des mémoires RAM et Flash. Cet ensemble est à la base du calcul binaire et du stockage, temporaire pour les données et définitif pour le système d'exploitation.
- **Radio et antenne** : Un capteur est conçu pour mettre en place des réseaux sans fils, les équipements étudiés sont donc généralement équipés d'une radio ainsi que d'une antenne afin de se connecter à la couche physique que constitue les émissions hertziennes.

- **LED, interface, capteur** : Prévus pour mettre en place des réseaux de capteurs, on retrouve donc des équipements bardés de différents types de détectrices et autres entrées.
- **Batterie** : Comme tout dispositif embarqué, ils disposent d'une alimentation autonome telle qu'une batterie, et parfois d'un panneau solaire pour permettre de recharger cette batterie, ce qui lui permet d'être disposé dans un endroit parfois inaccessible.

Cependant quelques différences existent suivant les fabricants. Chacun d'eux développe son type de capteurs, ces types peuvent être mica, mica2, telos ou telosb par exemple. Avec des contraintes hardware aussi strictes dues à la miniaturisation des capteurs, la partie software doit être la plus adaptée possible, d'où un lien très fort entre ces deux parties.

1.2.4 Capteur intelligent

Le terme capteur intelligent (smart sensor ou intelligent sensor) a été utilisé dans l'industrie des capteurs pour désigner des capteurs qui ne fournissent pas seulement des mesures, mais aussi une fonctionnalité aux mesures spécifiques. Par rapport à un capteur classique, un capteur intelligent intègre de nombreux éléments électroniques additionnels, ainsi que des unités programmables et des aspects logiciels nécessaires au traitement des données, aux calculs, à la communication numérique. Il est donc caractérisé par sa capacité à effectuer une collecte des mesures, les traiter et à les communiquer au monde extérieur [2].

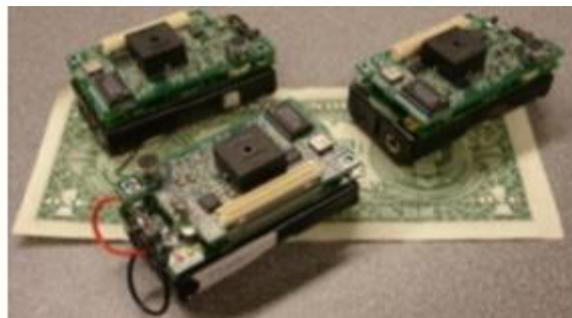


Fig. 1.3Exemple de capteur intelligent.

1.2.5 RCSFou WSN (Wireless Sensor Network)

Un réseau de capteurs sans fil est un type spécial de réseaux ad hoc avec un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs capables de recevoir et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome sans intervention humaine [04]. La

position de ces nœuds n'est pas obligatoirement prédéterminée, ils peuvent être aléatoirement dispersés dans une zone géographique appelée « champ de captage » correspondant au terrain d'intérêt pour le phénomène capté (par exemple : lâchée de capteurs sur un volcan pour étudier les phénomènes volcanologiques et leurs évolutions).

Le réseau possède en général un nœud particulier, la base (ou sink), connectée avec les autres nœuds par un réseau filaire est reliée à une alimentation électrique.

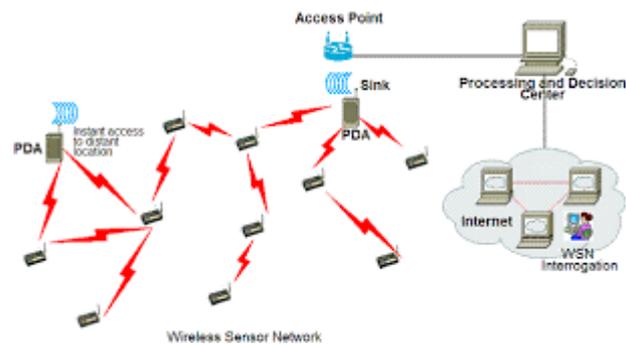


Fig. 1.4 Réseaux de capteurs.

Les technologies actuelles en matière de réalisation de composants électroniques et en particulier, de microprocesseurs, permettent de développer des équipements de taille et de poids de plus en plus réduits. Cela a permis l'apparition d'objets informatiques portables de plus en plus puissants, tels que les ordinateurs portables et les assistants personnels (PDA), ainsi que la communication entre ces équipements qui est de type sans fil. L'utilisation d'une interface sans fil introduit des différences par rapport à la communication par câble. Tout d'abord, le spectre radio où la capacité disponible pour le transfert de données est limitée.

D'où, l'ajout de câble suffit pour augmenter le nombre d'utilisateurs pouvant être satisfaits sur un réseau fixe, la bande de fréquences occupée par un réseau mobile ne peut pas être étendue. Cette restriction limite également le débit disponible imposant la nécessité d'une utilisation efficace du canal.

En suite, la qualité des liens radio peut varier avec le temps au gré des diverses interférences et de la mobilité des nœuds. Cette situation mène donc à un taux d'erreurs de transmission plus important que sur un réseau filaire et surtout à un taux très fluctuant.

1.3 Historique des réseaux de capteurs sans fil

Les récents progrès des nouvelles techniques ont provoqué une énorme importance dans le domaine des réseaux sans fil. La technologie des réseaux de capteurs sans fil est devenue une des merveilleuses technologies dans le 21ème siècle, les réseaux de capteurs ont montré leur impact sur notre vie quotidienne.

CHONG, et al. [SN10] ont parlé de trois générations des nœuds de capteurs, Le tableau suivant illustre l'évaluation des réseaux de capteurs :

Génération	Période	Taille	Poids	Batterie
1 ^{ère}	Les années 80 et 90	Grande boîte à chaussures	Kilogrammes	Grosse
2 ^{ème}	Entre 2000 et 2003	Boîte de cartes	Grammes	AA
3 ^{ème}	2010	Particule de poussière	Négligéable	Solaire

Tab.1.1 Les trois générations des nœuds de capteurs [3].

1.4 Classification des réseaux sans fil

Les réseaux sans fil se déclinent en plusieurs catégories, selon la distance qu'ils couvrent :

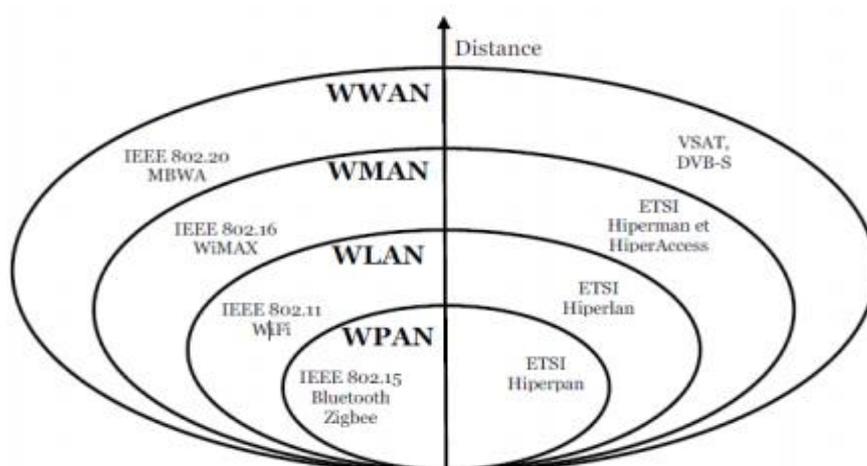


Fig. 1.5 Classification des réseaux sans fil selon la portée.

1.4.1 Les réseaux personnels sans fil (WPAN)

Les réseaux personnels sans fil (WPAN), sont des réseaux à très faible portée (de l'ordre d'une dizaine de mètres). Ils sont le plus souvent utilisés dans le cadre du Wearable Computing [53] ou informatique vestimentaire qui consiste à faire communiquer entre eux des matériels présents sur une personne (par exemple une oreillette et un téléphone portable). Ils sont également utilisés pour relier des équipements informatiques entre eux (par exemple pour relier une imprimante ou un PDA (Personnal Digital Assistant) à un ordinateur de bureau). Aujourd'hui, le réseau personnel sans fil le plus connu est le Bluetooth [38]. Deux nouvelles technologies apparaissent : l'une permettant un débit élevé (UWB : ultra wide band), et l'autre la connexion d'équipements contraints énergétiquement (ZigBee).

1.4.2 Les réseaux locaux sans fil (WLAN)

Les réseaux locaux sans fil sont généralement utilisés à l'intérieur d'entreprises, d'universités mais également chez les particuliers depuis le développement des offres à haut débit. Ces réseaux sont principalement basés sur la technologie IEEE 802.11 [65] soutenue par le WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) ou sur la technologie Hiper Lan 1 et son remplaçant Hiperlan 2 soutenue par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Ils offrent des débits de transmission beaucoup plus élevés et des zones de couverture beaucoup plus larges que dans le cas des réseaux WPAN.

1.4.3 Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN)

Les réseaux métropolitains ont pour objectif de créer un ensemble de liens de communication sur une zone étendue de la taille d'une ville ou d'une région. Ces liens peuvent servir à interconnecter plusieurs sites d'une même entreprise ou d'une administration.

1.4.4 Les réseaux étendus (WWAN)

Les seules technologies de WWAN disponibles sont des technologies utilisant les satellites géostationnaires ou en orbite basse pour relayer l'information entre plusieurs points du globe. Il existe plusieurs standards de réseaux utilisant les satellites comme VSAT (Very Small Aperture Terminal) [44] (utilisés pour la transmission de transactions bancaires) ou DVB-S (Digital Video Broadcasting - Satellite) [66] (norme grand public pour les diffusions de télévision, radio et service de données par satellite).

1.5 Caractéristiques des réseaux de capteurs

Les données captées par les nœuds sont acheminées grâce à un routage multi-saut à un nœud considéré comme un "point de collecte" appelé nœud-puits (ou sink). Ce dernier peut être connecté à l'utilisateur du réseau via Internet, un satellite ou un autre système. L'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises pour récolter les données environnementales captées par le biais du nœud-puits. Les progrès conjoints de la microélectronique, microtechnique, des technologies de transmission sans fil et des applications logicielles ont permis de produire à coût raisonnable des micro-capteurs de quelques millimètres cubes de volume, susceptibles de fonctionner en réseaux. Ils intègrent : une unité de captage chargée de capter des grandeurs physiques (chaleur, humidité, vibrations, rayonnement...) et de les transformer en grandeurs numériques, une unité de traitement informatique et de stockage des données et un module de transmission sans fil.

1.6 Applications

La diminution de taille et du coût des micro-capteurs, l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermique, optique, vibrations,...) et l'évolution des supports de communication sans fil, ont élargi le champ d'application des réseaux de capteurs. Ils s'insèrent notamment dans d'autres systèmes tels que le contrôle et l'automatisation des chaînes de montage. Ils permettent de collecter et de traiter des informations complexes provenant de l'environnement (météorologie, étude des courants, de l'acidification des océans, de la dispersion de polluants, etc.). Certains prospectivistes pensent que les réseaux de capteurs pourraient révolutionner la manière même de comprendre et de construire les systèmes physiques complexes, notamment dans les domaines militaire, environnemental, domestique, sanitaire et de la sécurité, etc.

Les réseaux de capteurs promettent de nouvelles applications à savoir :

- La surveillance de l'environnement (météo, agriculture, etc.) [2–4]
- Les applications militaires (suivi des mouvements de l'ennemi) [5]
- Les applications liées au bâtiment (maison intelligente, sécurité, etc.) [6,7]
- Les applications médicales (suivi des personnes âgées) [8,9]
- Les applications industrielles (suivi du procédé industriel, etc) [10,11]



Fig. 1. 6 Applications des réseaux de capteurs

1.7 Architecture de communication dans les réseaux de capteurs

Le modèle de communication comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI ainsi que trois couches pour la gestion d'énergie, la gestion de la mobilité et la gestion des tâches.

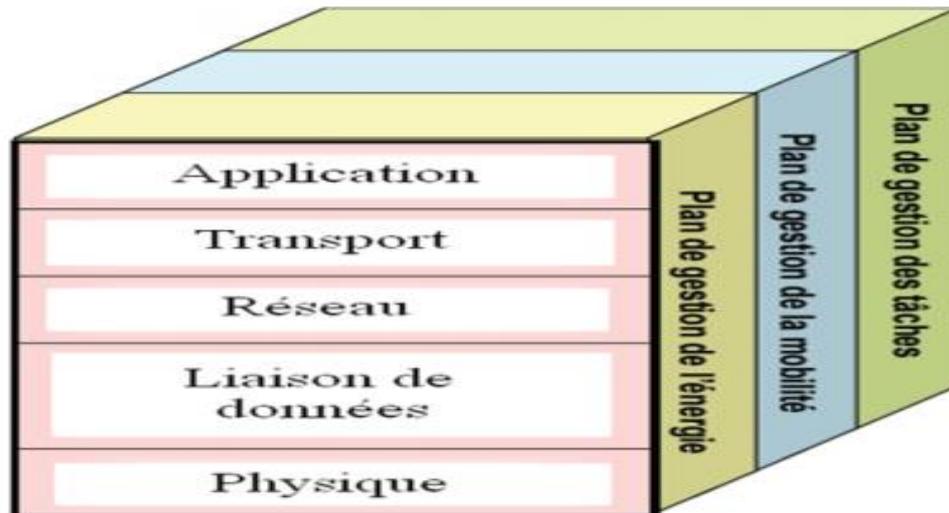


Fig. 1.7 Modèle en couches du réseau de capteurs sans fil.

1.7.1 Rôles des couches

1. Couche physique : Matériels pour envoyer et recevoir les données.

2. Couche liaison de données : Gestion des liaisons entre les nœuds et les stations de base, contrôle d'erreurs.

3. Couche réseau : Routage et transmission des données.

4. Couche transport : Transport des données, contrôle.

5. Couche application : Interface pour les applications au haut niveau.

6. Plan de gestion de mobilité : Gestion des mouvements des nœuds.

7. Plan de gestion de tâche : Balance les tâches entre les nœuds afin d'économiser de l'énergie.

1.8 Conclusion

Un réseau de capteurs est une collection de capteurs déployés dans une zone de capture pour prélever des mesures physiques. Dans ce chapitre, nous avons introduit ce type de réseau, l'architecture, caractéristiques, et la communication des réseaux de capteurs, ainsi que les domaines d'applications de ce genre de réseau. Dans le deuxième chapitre nous présenterons le standard IEEE 802.15.4.

2.1 Introduction

Depuis leur apparition les WPAN (Wireless Personal Area Network) ont suscité un intérêt croissant de la part du monde de la recherche et de l'industrie, ce qui a donné lieu à un nombre conséquent de propositions. Des solutions intéressantes aux problèmes posés par les contraintes dans les réseaux de capteurs et surtout au problème de la consommation énergétique. Bien que chacune de ces contributions apporte une solution innovante à un problème donné, le fait qu'elles ne soient pas interopérables freine le déploiement de ces réseaux.

Une solution au problème d'interopérabilité dans les nouvelles technologies peut être la standardisation qui permet de créer une base commune de travail pour tout intervenant dans le domaine afin de pouvoir produire du matériel et logiciel compatible et interopérable[14].

Selon l'article 1 du décret n°2009-697 du 16 juin 2009 relatif à la normalisation : "La normalisation est une activité d'intérêt général qui a pour objet de fournir des documents de référence élaborés de manière consensuelle par toutes les parties intéressées, portant sur des règles, des caractéristiques, des recommandations ou des exemples de bonnes pratiques, relatives à des produits, à des services, à des méthodes, à des processus ou à des organisations. Elle vise à encourager le développement économique et l'innovation tout en prenant en compte des objectifs de développement durable."

Le monde des réseaux et de l'internet compte deux organismes de standardisations très influents: L'IEEE et IETF. Ces deux organismes ont tous deux comme objectif de standardiser:

- Les couches basses du modèle OSI (physique et MAC) pour l'IEEE.
- Les couches hautes pour l'IETF (réseau, transport, etc.).

Le travail de standardisation a déjà porté ses fruits avec l'internet et la téléphonie qui ont

pu se propager et atteindre leur maturité.

Depuis l'apparition des réseaux de capteurs, il y a eu plusieurs initiatives de standardisation, propriétaire comme l'alliance ZigBee ou Wavenis, ou non propriétaire comme le standard IEEE 802.15.4 et les RFC de RPL et 6LowPAN [15].

2.2 Standard IEEE 802.15.4

Le groupe IEEE 802 fondé en février 1980, a eu pour tâche de standardiser les couches basses des réseaux locaux (LAN) et métropolitains (MAN) par le biais de liaisons filaires ou sans fil. Ce groupe a, entre autres, produit des standards incontournables, comme:

- 802.3 : Ethernet
- 802.11 : Wifi
- 802.15.1 et 802.15.3 : Bluetooth

Les deux derniers standards cités ci-dessus traitent des réseaux sans fil, mais comme dit précédemment, avec l'apparition des réseaux Personnel WPAN les contraintes et les besoins ont changé, le principal but n'étant plus d'atteindre des débits toujours plus élevés mais de maximiser la durée de vie des réseaux. De ce fait ces technologies ne peuvent être utilisées pour les réseaux WPAN.

C'est pour cette raison que le standard IEEE 802.15.4 a été proposé. Ce dernier ne traite que les deux premières couches du modèle OSI dans les WPANs . Ces réseaux ont pour particularité d'être des réseaux sans fil, caractérisés par un faible débit et une faible consommation énergétique. Ils ne couvrent que des distances réduites de l'ordre des dizaines de mètres et ne nécessitent pas ou très peu d'infrastructures [17].

2.3 Architecture WPAN

Un WPAN qu'on appellera par la suite PAN, est composé d'un ensemble de nœuds ayant pour rôle de collecter et de transmettre l'information vers un organe central du réseau, qui sera en charge de traiter ces informations ou de jouer le rôle de passerelle (gate way). Ce dernier a pour nom puits (PAN coordinateur) dans la littérature. Le standard IEEE 802.15.4 définit deux types de nœuds: FFD (Full Fonction Device) et RFD (Reduced Fonction Device) pouvant jouer le rôle de:

- PAN Coordinateur qui est le nœud initiateur du réseau. Il a comme attribution d'initier, de gérer l'ensemble du réseau et de jouer le rôle de passerelle vers l'extérieur
- Coordinateur qui est par définition un FFD et qui aura pour tâche de gérer une zone donnée du réseau (cluster) et de router les paquets de ses fils vers le PAN coordinateur.
- Nœuds terminaux qui sont de simples nœuds périphériques (actionneurs, capteurs).

On peut définir les FFD et RFD comme suit:

Les FFD (Full-Function Devices) : peuvent communiquer avec des FFD et des RFD, et peuvent ainsi jouer le rôle de coordinateur de PAN (puits), de routeur (Coordinateur) ou de simple périphérique (capteur, interrupteur).

Les RFD (Reduced-Function Devices) : sont des nœuds terminaux utilisés dans des contextes simples comme les interrupteurs ou de simples capteurs. Ces nœuds ne peuvent communiquer qu'avec des FFD (coordinateur) et ne peuvent participer au routage dans le réseau. Ils ne sont ainsi que des nœuds terminaux dans le réseau avec des ressources moindre en comparaison avec des FFD [19].

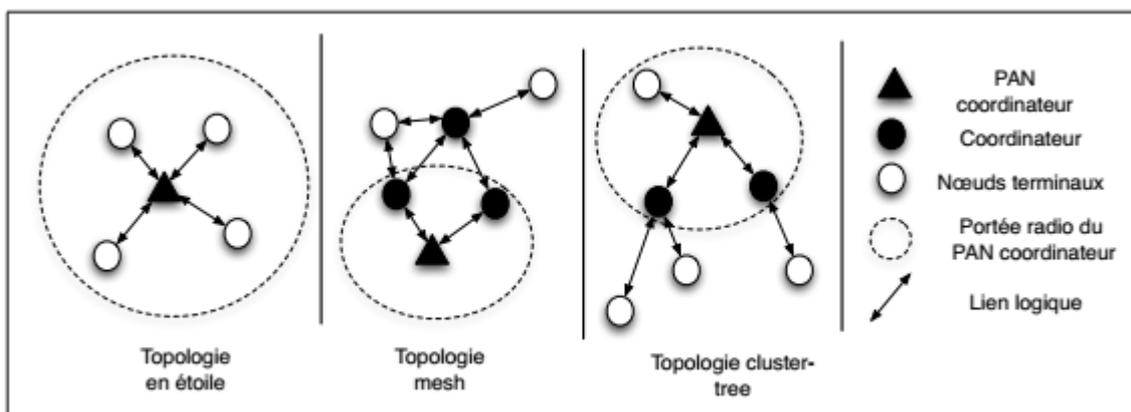


Figure 2.1 Topologies supportées dans IEEE 802.15.4.

Le standard IEEE 802.15.4 supporte plusieurs types de topologies (figure 3.1): la topologie en étoile, la topologie point à point (peer-to-peer) et la topologie en arbre (cluster-tree). Il est possible d'avoir plusieurs réseaux PAN opérant dans la même zone mais fonctionnant indépendamment les uns des autres, chacun utilisant un identifiant de PAN différent.

1. Topologie en étoile

La topologie en étoile impose des communications s'établissant directement et uniquement entre le nœud qui gère le réseau défini précédemment (PAN coordinateur) et les nœuds se trouvant dans sa portée radio. Le PAN coordinateur sera le nœud initiateur du réseau et tout le trafic devra passer par ce nœud.

2. Topologie point à point

Dans la topologie point à point, chaque nœud pourra communiquer avec n'importe quel autre nœud du réseau grâce à la collaboration des nœuds intermédiaires (Coordinateur) sollicités afin de relayer les paquets jusqu'à la destination. Cette topologie permet de réaliser des réseaux beaucoup plus étendus, mais il faudra pour cela ajouter un protocole de routage.

3. Topologie cluster-tree

La topologie cluster-tree n'est qu'un cas particulier de la topologie peer-to-peer. La seule différence avec cette dernière est que le réseau sera hiérarchisé avec un PAN coordinateur, des coordinateurs (têtes de cluster) gérant les nœuds qui leur sont connectés, ainsi que des nœuds terminaux communiquant uniquement avec leur coordinateur.

Le standard IEEE 802.15.4 ne définit pas de méthode pour la création de topologie, il définit uniquement les topologies pouvant être utilisées. La méthode de création de topologie est laissée à la libre interprétation du développeur. Néanmoins, la méthode d'association des nœuds au réseau a été spécifiée. Dans Cuomo *et al* [46,47] étudient les propriétés (nombre de fils par père, profondeur de l'arbre, taux d'association au réseau, énergie consommée pour l'association etc.) des cluster-trees obtenus avec le mécanisme d'association au réseau fourni dans le standard IEEE 802.15.4. Dans [48], Zheng *et al* ont étudié, en détail le mécanisme d'association au réseau proposé par le standard, et en ont démontré son efficacité. Les auteurs ont entre autres étudié l'impact du nombre de coordinateurs ainsi que de la fréquence d'envoi des Beacons sur la formation du réseau.

2.4 La couche Physique dans IEEE 802.15.4

L'étude en détails de cette couche étant en dehors du spectre de ce mémoire, nous ne détaillerons ici que ses aspects les plus importants. La couche physique a pour rôle de gérer le support physique sur lequel seront faites les transmissions. Elle définit les techniques par lesquelles les bits seront transformés en signaux analogiques et inversement.

La couche physique dans IEEE 802.15.4 offre les fonctionnalités suivantes :

- Gestion de l'activation et de la désactivation du module radio, la radio pourra prendre trois états différents: réception, émission et éteinte.
- La détection de la puissance du signal sur le canal (Energy Detection (ED)).
- La possibilité de remonter à la couche supérieure des informations sur la qualité du lien radio après réception d'une trame : LQI (Link Quality Indication).
- La détection de l'occupation ou non du médium : CCA (Clear Channel Assessment).
- La sélection d'un canal de transmission parmi les différents canaux disponibles.
- Le standard IEEE 802.15.4 [49] propose quatre différentes couches physiques exploitant chacune des techniques de modulation, d'étalement de spectre ou des bandes de fréquences différentes comme présenté ci-dessous:
 - ✓ 868/915 MHz utilisant Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) comme technique d'étalement de spectre et la modulation Binary Phase-Shift Keying (BPSK).
 - ✓ 868/915 MHz utilisant aussi la technique d'étalement de spectre DSSS mais combinée avec une modulation Offset Quadrature Phase-Shift Keying (O-QPSK).
 - ✓ 868/915 MHz utilisant l'étalement de spectre Parallel Sequence Spread Spectrum (PSSS) et combinant les deux techniques de modulation BPSK et Amplitude Shift Keying (ASK).
 - ✓ 2450 MHz utilisant DSSS pour l'étalement de spectre et la O-QPSK comme modulation. Le standard offre au total 27 canaux de communication. Selon le choix de la bande de fréquence et de la couche physique on aura des débits allant de 20 à 250 kbit/s (3.1).

Bande de fréquence	Chiprate (kchip/s)	Modulation	Kbit/s	Ksymboles/s	Symboles
868-868.6	300	BPSK	20	20	Binary
902-928	600	BPSK	40	40	Binary
868-868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
902-928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868-868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary Orthogonal
902-928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal
2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

Table 2.1:Récapitulatif de la couche physique dans IEEE 802.15.4.

2.5 La couche MAC dans IEEE 802.15.4

La couche MAC (Medium Acces Control), comme son nom l'indique, aura pour rôle de gérer l'accès au canal avec le mécanisme CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Cette couche offrira un mécanisme d'économie d'énergie, une des fonctionnalités les plus importantes dans les réseaux de capteurs sans fil. Nous pouvons résumer ce mécanisme d'une manière très simple: l'utilisation de la radio représentant le plus grand facteur de dépense énergétique doit être limité au strict minimum en la gardant éteinte la majorité du temps.

La couche MAC offre aussi d'autres fonctionnalités de contrôle liées à:

- La gestion du réseau.
- La gestion des acquittements.
- La gestion de l'adressage (adresse IEEE 802.15.4 codé sur 64 et 16 bits).
- L'allocation et la gestion des Slots dédiés.
- Le mécanisme de découverte de voisinage.

2.5.1 Les trames dans IEEE 802.15.4

Le standard IEEE 802.15.4 propose quatre types de trames pour les échanges entre les nœuds:

- Trames Beacon (Beacon frame) qui sont envoyées uniquement par les nœuds Coordinateurs et servent à administrer le réseau;
 - Trames de données (Data frame) qui servent au transfert des données utiles entre les nœuds;
 - Trames d'acquiescement (Acknowledgment frame) qui servent à notifier la bonne réception des trames;

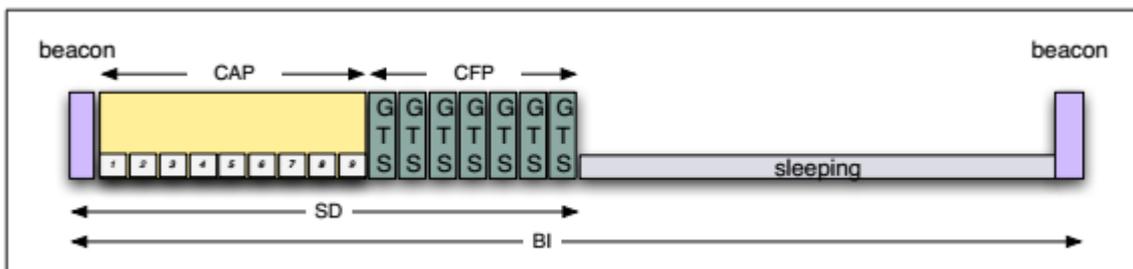


Fig. 2.2: Structure de la super trame dans IEEE 802.15.4.

- Trames de contrôle (Command frame) qui servent à effectuer des demandes spécifiques comme par exemple l'association au réseau

2.5.2 Modes de fonctionnement dans IEEE 802.15.4

Le standard IEEE 802.15.4 offre deux modes de fonctionnement. Le premier est le mode dit non balisé (non Beacon Enabled mode) aussi appelé Unslotted mode où aucun mécanisme de duty cycle (réveil périodique) n'a été spécifié en l'état. Ce mode est plus adapté à des applications où les nœuds n'ont aucune contrainte énergétique (alimenté sur secteur). Dans ce mode, il y a absence de synchronisation entre les nœuds du réseau. Afin que ces derniers puissent communiquer entre eux, ils doivent laisser leur radio allumée ou se réveiller

périodiquement afin d’interroger le coordinateur pour savoir s’il ya des messages en attente, ce mode étant laissé ouvert par le standard on peut imaginer l’utilisation soit de la technique de préambule soit d’une méthode de synchronisation [21].

Dans ce mode le mécanisme pour se protéger des collisions sera le CSMA/CA Unslotted. Le deuxième mode appelé mode balisé (Beacon Enabled mode) ou Slotted mode, étant le mode le plus important dans le standard, ses performances en termes de débit, consommation énergétique, packet delivery ratio et fiabilité ont fait l’objet d’un grand nombre d’études [5053]. Le mode Beacon Enabled est un mode dit synchronisé . Les nœuds doivent suivre une structure périodique appelée super trame (Super Frame) représentée sur la figure 2.3.

Cette structure périodique commence toujours par l’envoi d’une trame par le coordinateur appelée Beacon. Cette trame Beacon a pour rôle de synchroniser les nœuds avec leur coordinateur, et fournir toutes les informations vitales au fonctionnement du réseau, comme par exemple l’identifiant du réseau, les données en attente au niveau du coordinateur (communication indirecte), le temps où le prochain Beacon est envoyé et la durée de la partie active de la super trame, etc[22].

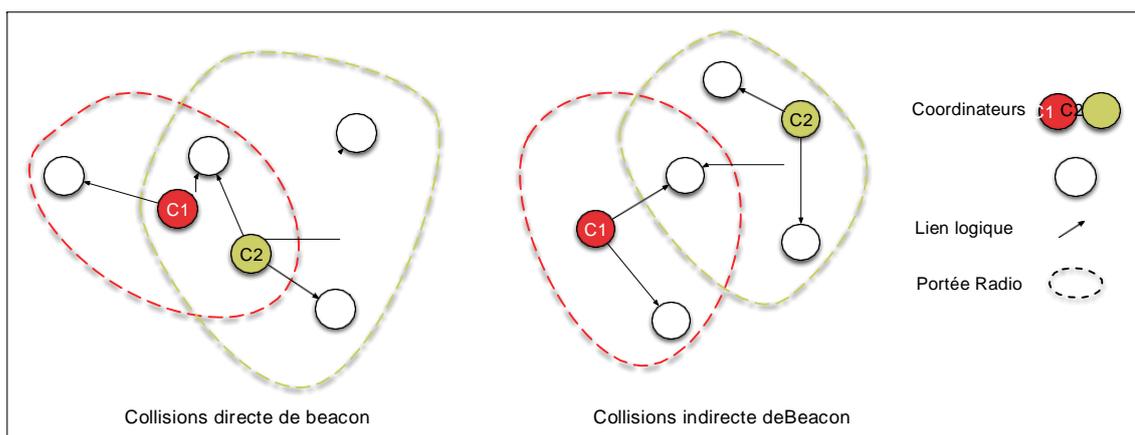


Fig. 2.3 Collisions de Beacon directes et indirectes

2.5.3 Transfert de données dans IEEE 802.15.4

Au sein des deux modes cités dans la section précédente (non BeaconEnabled et Bacon Enabled), et selon la topologie utilisée, le standard définit trois modes de transfert dedonnées.

2.5.3.1 Transmission de données des fils vers le coordinateur (transmission directe)

Les données sont envoyées de la part des fils vers leur coordinateur. Ce mode est utilisé dans la topologie cluster-tree et la topologie en étoile, si c'est le mode Beacon Enabled qui est utilisé, les nœuds doivent d'abord réceptionner le Beacon du coordinateur avant d'envoyer leurs trames en utilisant le CSMA/CA Slotted durant la partie active de la super trame pour leur transmission. Si au contraire, c'est le mode Non Beacon Enabled qui est utilisé, les nœuds envoient directement leurs données en passant par le CSMA/CA Unslotted. Dans ce cas, les coordinateurs devront rester éveillés dans l'impossibilité d'économiser leurs ressources.

2.5.3.2 Transmission de données du coordinateur vers ses fils (indirecte)

Les données sont envoyées par le coordinateur vers ses fils. Ce mode de transmission est aussi utilisé si le réseau est hiérarchisé (topologie cluster-tree ou étoile). Si le réseau utilise le mode Beacon Enabled, le coordinateur doit indiquer qu'il y a des trames en attente pour ses fils dans son Beacon. Ces derniers savent alors, à la réception de ce dernier, qu'ils ont une donnée en attente auprès de leur coordinateur et peuvent ainsi en solliciter la transmission. En mode non Beacon Enabled, en l'absence d'envoi périodique des Beacon, les nœuds demandent périodiquement à leur coordinateur s'il y a des données en attente (polling).

2.5.3.3 Transmission de données Pair-à-pair

Si le réseau est un réseau de type pair-à-pair, les nœuds communiquent entre eux en utilisant le CSMA/CA Unslotted. Dans ce cas, soit les nœuds restent éveillés tout le temps pour d'éventuelles transmissions, soit ils doivent se synchroniser.

2.5.4 Définition de la super trame dans IEEE 802.15.4

La super trame revient périodiquement afin de fournir un mécanisme de synchronisation aux nœuds qui doivent passer la majeure partie de leur temps la radio éteinte, et ceci pour réduire le coût de consommation énergétique tout en évitant les problèmes de connectivité liés aux réveils décalés des nœuds. La super trame se compose des trois parties suivantes (cf. Fig.3.2):

- Un Beacon (Balise).
- La partie active de la super trame où les nœuds peuvent avoir la radio allumée.

- La partie inactive où les nœuds devront éteindre leur radio afin de faire des économies d'énergie .

A chaque réception d'une balise, tous les dispositifs sont informés de la durée de la Super trame. L'envoi régulier de balises permet d'informer l'ensemble des dispositifs sur d'éventuels changements dans la super trame et compenser les dérives d'horloges. La partie active de la super trame est divisée, quant à elle en deux sous-parties :

- La CAP (Contention Access Period) où les nœuds communiquent avec leur coordinateur en utilisant le mécanisme d'accès au canal CSMA/CA slotté.
- La CFP (Contention Free Period) étant une partie optionnelle de la super trame où un noeud pourra demander l'attribution exclusive d'un slot appelé GTS. Les communications entre noeuds et coordinateurs se font pendant la CAP en utilisant le mécanisme d'accès au canal CSMA/CA Slotté (Slotted-CSMA/CA).

Durant la CFP, si un nœud s'est déjà vu attribuer un slot il n'aura aucun besoin de CSMA/CA puisque ce slot lui est attribué d'une manière unique. Les GTS ont été proposés afin de permettre à des nœuds ayant des contraintes temporelles de réserver un slot [54] où il pourra envoyer sa donnée vers le coordinateur sans utiliser le CSMA/CA.

Plusieurs GTS peuvent être attribués par noeud. Le nombre de GTS par super trame ne pourra néanmoins dépasser sept slots qui sont réservés en partant du dernier slot de la partie active de la super trame.

Afin de se voir allouer un GTS par son coordinateur un nœud doit envoyer une requête GTS Request pendant la CAP en utilisant le CSMA/CA Slotted. Le nœud recevra la réponse à sa demande de GTS dans le Beacon. Le coordinateur devra aussi mettre à jour la taille de la CAP dans le Beacon en indiquant le dernier slot afin que les autres nœuds sachent qu'un GTS a été attribué. Comme présenté précédemment un coordinateur peut allouer au maximum sept GTS de la super trame (sept slots). Un nœud demandant un GTS se verra allouer l'ensemble du slot et cela même si la longueur de ce dernier est supérieure à ses besoins. Les GTS dépendant de la taille des slots (cf.fig. 3.2) peuvent être une source de gaspillage de bande passante, c'est pourquoi Koubaa et al proposent l'algorithme IGAME (Implicit GTS Allocation Mechanism) [55], qui a pour but de permettre l'utilisation d'un slot GTS par plusieurs nœuds afin d'éviter que les slots ne soient sous exploités [23].

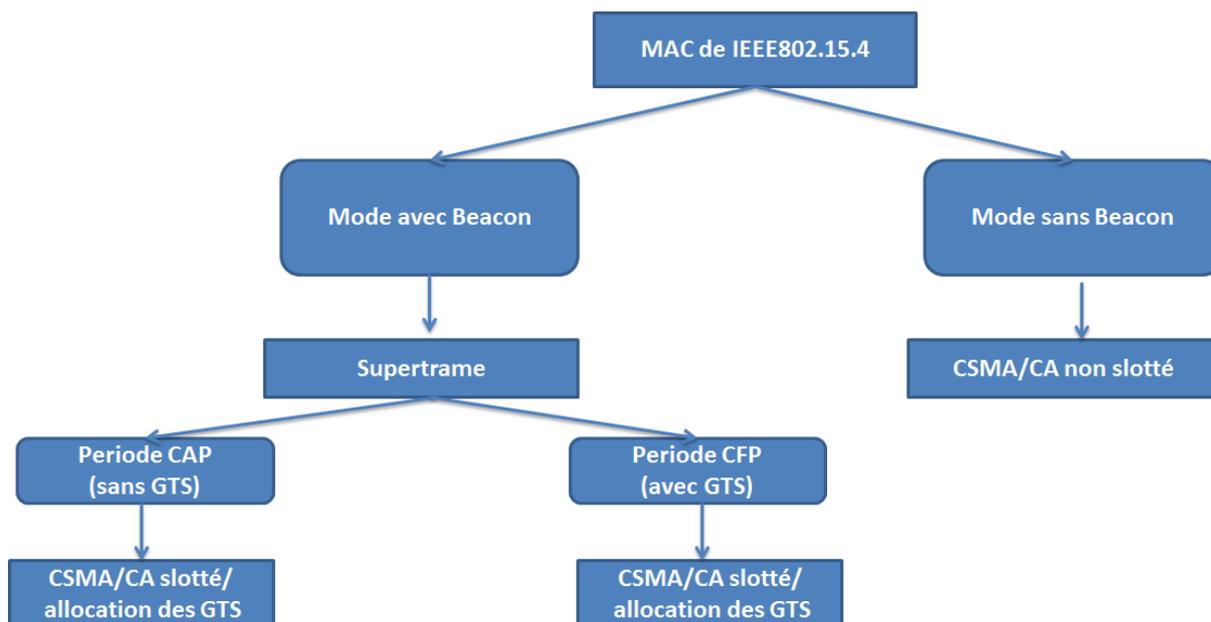


Fig. 2.4 Les modes d'accès au support

2.5.5 Méthodes d'accès au canal

La Couche MAC de IEEE802.15.4 propose l'utilisation du mécanisme CSMA/CA comme méthode d'accès au canal afin de se prémunir des collisions. Ce mécanisme d'accès au canal est étudié en profondeur dans le chapitre suivant.

Le CSMA/CA a pour principe de désynchroniser le temps d'envoi des trames des différents nœuds en utilisant un tirage de temps aléatoire dans un intervalle conditionné par le Backoff Exponent. Après ce temps d'attente, les nœuds se doivent de vérifier l'état du canal avant de transmettre.

Dans IEEE 802.15.4 deux versions de CSMA/CA ont été proposées fonctionnant de la même façon à quelques différences près: CSMA/CA Slotté (Slotted CSMA/CA) utilisée dans le mode Beacon, et CSMA/CA non-slotté (Unslotted CSMA/CA) utilisée dans le mode non Beacon illustré dans la figure 2.6.

Avant d'entamer la description du fonctionnement du CSMA/CA, nous devons tout d'abord définir la terminologie utilisée dans IEEE 802.15.4:

- Unit Backoff Period: Unité de temps égale à 20 symboles.
- BE: Backoff Exponent initialisé à $MacMinBE=3$ par défaut.
- Backoff: Temps d'attente aléatoire tiré dans l'intervalle $: [0, 2^{BE}-1]$ "a Unit Backoff period.

- CW (Contention Window): Ce paramètre n'est utilisé que dans le mode Slotted et représente le nombre d'unités de temps après le temps Backoff où le canal doit être libre avant transmission.
- NB: Nombre d'essais d'accès au canal pour la transmission en cours, initialisé à zéro.
- macMax CSMA Backoffs: Le nombre de fois où le canal est trouvé occupé avant d'abandonner l'émission de la trame, initialisé à 3.
- macMax Frame Retries: Le nombre de retransmissions maximum autorisé pour chaque trame, initialisé à 4.

Le Fonctionnement du CSMA/CA slotted est le suivant. Avant tout essai de transmission d'une nouvelle trame les nœuds doivent effectuer les étapes suivantes :

1. Initialisation des paramètres à leur valeur par défaut (CW, NB, BE).
2. Tirage d'un temps aléatoire (Backoff) afin de désynchroniser les transmissions.
3. Les nœuds alignent leur début de Unit Backoff Period sur ceux de la super trame, tous les nœuds doivent s'assurer qu'il reste assez de temps avant la fin de la super trame pour le Backoff, les deux CW, l'envoi de la trame, et l'acquittement sice dernier est demandé.
4. A la fin du temps d'attente aléatoire (Backoff) ,les nœuds doivent tester l'état du canal en effectuant ce qu'on appelle un CCA (Clear Channel Assessment) qui dure 8 Symboles de temps:

- Si le canal est détecté occupé, le nœud incrémente toutes les constantes de l'algorithme ($NB = NB + 1$, $BE = \min(BE + 1, macMaxBE)$ et $CW = 2$).

- Si $NB > macMax CSMA Backoffs$ e.g le nombre maximum d'essais permis pour la transmission d'une trame est dépassé, le nœud abandonne l'envoi de la trame en cours. Dans le cas contraire le nœud retire un nouveau Backoff afin de retenter l'envoi de la trame (étape 2).

- Si au contraire le canal est détecté libre le nœud décrémente la valeur de CW ($CW = CW - 1$). Si $CW = 0$ la trame est envoyée au début du prochain Unit Backoff Period, sinon le nœud exécute un nouveau CCA après un Unit Backoff Period.

Au contraire, si le non Beacon Enabled mode est utilisé c'est le CSMA/CA Unslotted qui sera alors utilisé par les nœuds afin d'accéder au canal. Comme pour le CSMA/CA Slotted, les nœuds passeront par les deux premières étapes citées ci-dessus: intialisation de (CW, NB, BE) et tirage du temps de backoff aléatoire. Les seules différences avec le Slotted CSMA/CA résident dans les deux points suivants:

- Les périodes de décrémentation des aUnit BackoffPeriod entre les nœuds en concurrence pour l'accès au médium sont à l'encontre du Slotted CSMA/CA indépendantes dans le temps i.e la décrémentation du backoff commence immédiatement après le temps d'attente aléatoire sans synchronisation sur le unit-backoff-period puisqu'il y a absence de supertrame.

· Avant de pouvoir transmettre, l'émetteur doit sonder le canal afin de savoir s'il est libre. En mode Unslotted, ceci n'est fait qu'une seule fois, alors qu'en mode Slotted CSMA/CA le canal devra être libre durant deux aUnit Backoff Period avant l'émission de la trame.

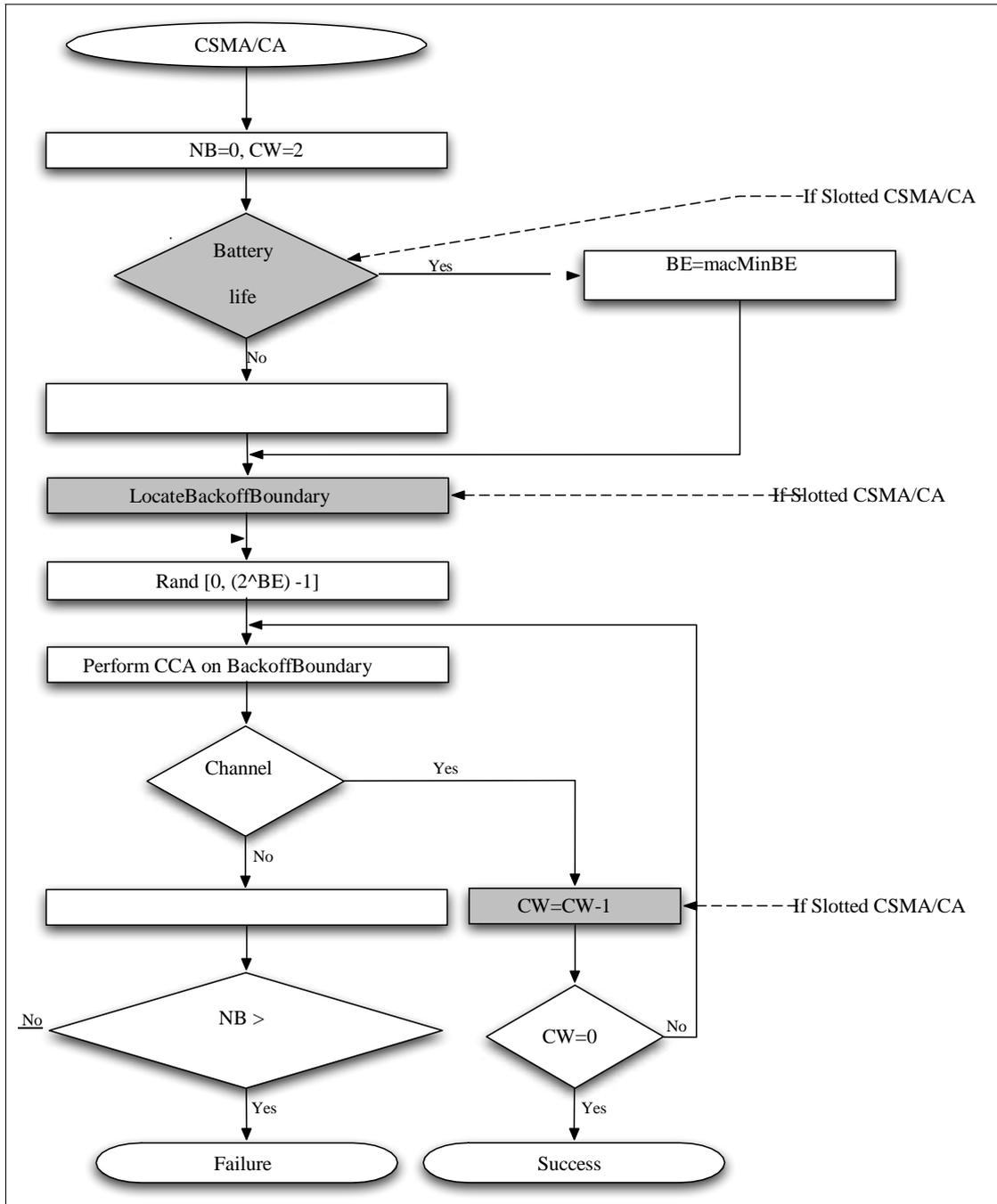


Fig. 2.5: CSMA/CA SLotted et Unslotted dans IEEE 802.15.4

2.6 Limites dans la norme IEEE802.15.4

Toutes les solutions proposées dans le standard IEEE 802.15.4 tendent dans l'absolu à faire des économies d'énergie tout en offrant de bonnes performances. La super trame a été proposée afin de gérer les communications tout en garantissant aux nœuds d'économiser l'énergie, néanmoins cette structure temporelle introduit plusieurs problématiques relatives au fonctionnement du réseau dont nous discutons ci-dessous.

2.6.1 Topologies

Le standard supporte plusieurs types de topologies, mais seule la topologie en étoile peut fonctionner correctement si le réseau a une faible densité en terme de nœuds. Pour ce qui est des topologies peer-to-peer et cluster-tree, il faudrait rajouter un certain nombre de mécanismes, tels que la construction de la topologie et la gestion des collisions de Beacon et la gestion des interférences entre les différents coordinateurs du réseau.

La solution afin de prendre en compte des topologies en multi-saut a été proposée dans la deuxième édition du standard IEEE 802.15.4 paru en 2006 sous forme d'une nouvelle structure pour la super trame.

La super trame d'origine a été découpée en deux parties avec pour seule condition que les deux parties de la super trame soient séparées par un temps appelé Start Time et que les valeurs de Beacon Order et Super frame Order soient les mêmes dans tout le réseau. Cette nouvelle super trame est représentée sur la figure 2.7 et se compose:

- ✓ D'une première partie appelée incoming super frame, où le nœud reçoit le Beacon de son coordinateur afin de communiquer avec lui.
- ✓ D'une deuxième partie qui s'appelle outgoing superframe où le nœud pourra envoyer son propre Beacon afin de communiquer avec ses fils.

Cette structure permet d'avoir du multi-saut en mode Beacon, mais introduit une nouvelle problématique concernant l'ordonnancement des Beacons des différents coordinateurs du réseau laissée ouverte par le standard.

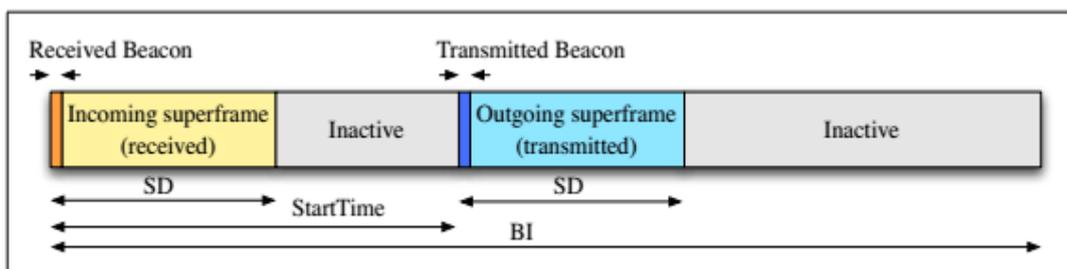


Fig. 2.6: L'incoming et l'outgoing supertrame dans IEEE 802.15.4

2.7 ZigBee

ZigBee est un protocole de haut niveau permettant la communication d'équipements personnels ou domestiques équipés de petits émetteurs radios à faible consommation ; il est basé sur la norme IEEE 802.15.4 pour les réseaux à dimension personnelle (Wireless Personal Area Networks : WPAN).

L'alliance ZigBee formée par un consortium d'entreprises a proposé un standard propriétaire qui offre des fonctionnalités allant de la couche réseau à la couche applicative.

Le standard ZigBee repose sur les couches basses du standard IEEE 802.15.4.

Dans Zigbee, ce que l'on a appelé précédemment PAN Coordinateur, Coordinateur et noeuds terminaux vont s'appeler respectivement le ZigBee Coordinateur (ZC), ZigBee Router (ZR) et ZigBee End Device (ZED) qui ne peut communiquer qu'avec son coordinateur (ZR).

Zigbee ou plus précisément la couche réseau du standard Zigbee a comme tâches les opérations suivantes:

- Découverte de voisinage;
- Création de topologie;
- Adressage;
- Routage ;

La couche application de ZigBee propose différents profils applicatifs selon l'utilisation voulue du réseau. Nous citerons par exemple:

- Domotique: éclairage, système d'alarme, chauffage, etc;
- ZigBee Smart Energy;
- Santé: suivi et monitoring de patients;
- Contrôle industriel: englobant la domotique et le contrôle de production;
- ZigBee Telecommunication Applicat ;

2.7.1 Adressage

À l'association d'un nœud au réseau, le coordinateur doit lui attribuer une adresse. L'attribution d'adresses dans ZigBee peut s'effectuer de deux manières différentes:

- Les adresses sont allouées d'une manière aléatoire et unique par la couche application jusqu'à l'épuisement total de ces dernières
- Les adresses sont attribuées hiérarchiquement.

L'avantage de cette dernière est d'être une technique distribuée qui garantit l'unicité des adresses allouées dans le réseau. Elle est utilisée dans les réseaux de type cluster-tree où chaque ZigBee routeur se verra attribuer une plage d'adresse unique dans le réseau à allouer à ses futurs fils.

Le coordinateur ZigBee fixera, lors de la formation du réseau, le nombre maximal de fils par parent (C_m), le nombre maximal de routeurs parmi ces fils (R_m) et la profondeur maximale du réseau (depth i.e. L_m). Avec ces trois valeurs il est possible de calculer la fonction $C_{skip}(d)$ eq. 3.6 représentant la taille du sous-bloc d'adresses pouvant être allouées à un parent se trouvant à la profondeur d . Si un nœud a une valeur de $C_{skip}(d)$ égale à zéro, il ne pourra accepter de fils et se comportera comme un nœud feuille. Le calcul de l'adresse du nouveau fils se fait par le biais de l'équation 3.5.

$$A_n = A_{parent} + C_{skip}(d) \cdot R_m + n \quad (3.5)$$

$$C_{skip}(d) = \begin{cases} 1 + C_m \cdot (L_m - d - 1) & \text{si } R_m = 1 \\ 1 + C_m - R_m - C_m \cdot R_m^{L_m - d - 1} / (1 - R_m) & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.6)$$

Cette technique d'adressage a comme désavantage, le fait qu'à chaque coordinateur sera attribuée une plage d'adresses à son association pour ses futures fils, si aucun nœud ne s'associe à ce coordinateur, ces adresses peuvent être considérées comme perdues.

2.8 Evolution de la norme IEEE 802.15.4

Un résumé des améliorations proposées par cet ensemble normatif est présenté dans le Tableau :

Version d'IEEE 802.15.4	Détaille et commentaires
IEEE 802.15.4-2003 [1]	Elle a été la première réalisation de la norme IEEE 802.15.4. Elle a été prévue pour deux couches physiques différentes : l'une pour les bandes a basse fréquences de 868 et 915 MHz l'autre pour 2.4 GHz.
IEEE 802.15.4-2006 [9]	La réalisation en 2006 de la norme IEEE 802.15.4 a prévu l'augmentation du débit réalisable sur la bande de basse fréquence. Elle mis a jour la couche physique de 868 et 915 MHz. Elle définit donc quatre nouveaux schémas de modulation dont trois sont utilisés pour les bandes à basses fréquences et un pour la 2.4GHz.
IEEE 802.15.4a-2007 [3]	Cette version de la norme IEEE 802.4 définit deux nouvelles couches physiques. L'une utilise la technologie "Ultra Wide Band (UWB)" et l'autre "Chirp Spread Spectrum (CSS)" à 2.4GHz.
IEEE 802.15.4c-2009 [4]	La version "c" à été mise à jours pour : 2.4GHz, 868 et 915MHz, UWB et la bande Chinoise 779-787MHz.
IEEE 802.15.4d-2009 [5]	2.4GHz, 868MHz, 915MHz et la bande japonaise 950-956MHz.
IEEE 802.15.4e-2012 [6]	Cette réalisation a définit des nouveaux mécanismes à la sous couche MAC de IEEE 802.15.4.

Tab2.2 Les amendements IEEE 802.15.4

2.9 Synthèse sur les travaux existants

La norme IEEE 802.15.4 est récente, elle concerne uniquement les deux premières couches du modèle OSI, à savoir la couche physique et la couche liaison de données adaptées aux réseaux sans fil à faible débit. C'est La sous-couche MAC qui assure le contrôle d'accès au canal. L'IEEE 802.15.4 définit deux modes de fonctionnement différents, à savoir (Buratti et al, 2011)[25] : Le mode sans BEACON et avec BEACON.

Le modèle de BIANCHI (Bianchi, 2000)[26] pour la modélisation analytique du protocole IEEE802.11 est considéré comme un modèle de référence à base duquel se sont construits la plupart des modèles qui existent dans la littérature. Dans (Park et al 2009) [27], les auteurs élargissent le modèle de Bianchi et calculent le débit et la consommation d'énergie dans les conditions de saturation. Dans (Wen et al, 2009)[28], les auteurs proposent un modèle de Chaîne de Markov à 2 Dimensions dans des conditions non saturées pour le mécanisme CSMA/CA slotté du protocole IEEE 802.15.4. En calculant la probabilité de distribution stationnaire de la chaîne de Markov, ils obtiennent une formule d'évaluation pour le débit et la consommation d'énergie. Dans (Yin, Lee, 2010) [29], les auteurs ont étudié la stabilité du débit, le délai moyen de la file d'attente ainsi que la problématique d'énergie de la couche MAC du protocole IEEE 802.15.4.

Le tableau 2.1résume les principaux travaux d'évaluation de performances les hypothèses et les paramètres considérées. Le sigle \surd signifie que l'hypothèse et/ou le paramètre a été pris en compte par l'auteur. Les hypothèses considérées sont : la prise en compte de l'ACK, la retransmission (Ret), la prise en compte du GTS (GTS) et la prise en compte de la période inactive (inact). Nous définissons les métriques de performances comme le débit (De), la fiabilité (F), le délai (D), l'énergie (E), le ratio de délivrance des paquets (R) et la probabilité de perte de paquet (P).

Travaux	Hypothèses				Métriques de performances					
	ACK	Ret	GTS	Inact	De	F	D	E	R	P
G. Lu (2004) [38]			✓		✓		✓	✓	✓	
Misic (2004) [45]	✓			✓	✓			✓		
T. Park (2005) [56]	✓			✓			✓	✓		
Misic (2006) [46]	✓	✓		✓			✓			
Koubaa (2007) [36]	✓		✓	✓			✓	✓		
Ramachandran (2007)[59]	✓	✓		✓			✓			
Patro (2007) [57]	✓				✓					✓
Pollin (2008) [58]	✓				✓			✓		
Sahoo (2008) [60]	✓	✓			✓			✓		
Park (2009) [55]	✓	✓		✓		✓	✓	✓		
Wen (2009) [61]	✓				✓		✓	✓		✓
Jung (2009) [33]	✓	✓		✓	✓					
Maratalo (2009) [42]				✓	✓		✓			
Faridi (2010) [30]	✓	✓			✓	✓	✓	✓		
Park (2013) [54]	✓	✓		✓		✓	✓	✓		

Tab 2.3 Les principaux travaux existants sur l'évaluation de performances du 802.15.4.

2.9.1 Modèles analytiques existants

La modélisation de la norme IEEE 802.15.4 est liée à la norme IEEE 802.11, car les deux normes sont basées sur la technique de backoff dite BEB (binary Exponential Backoff). Cependant, dans [43], les auteurs ont fait remarquer que, contrairement à l'algorithme CSMA/CA de la norme IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function : mécanisme d'accès pour la norme IEEE 802.11) où les nœuds surveillent continuellement le canal, l'algorithme CSMA/CA utilisée dans la partie CAP dans IEEE 802.15.4 détecte le canal d'une manière discontinue. Néanmoins, tous les travaux d'évaluation de performances par chaînes de Markov s'inspirent principalement de celui de Bianchi [24] pour la norme IEEE 802.11.

2.9.1.1 Modèle de G. Bianchi pour la norme IEEE 802.11

Dans [24], Bianchi a proposé un modèle analytique, du protocole DCF de la norme IEEE802.11, simple et précis pour calculer le débit effectif d'un réseau saturé, avec un nombre de stations fixe et sous l'hypothèse d'un canal idéal. Un modèle de Markov a été utilisé pour obtenir les probabilités stationnaires pour qu'une station émette un paquet dans un time slot généré aléatoirement. Le modèle est un processus stochastique bidimensionnel $f(s(t); b(t))$ ou $s(t)$ représente l'étage du backoff d'une station donnée à un temps t et $b(t)$ représente le compteur du temps backoff pour une station donnée.

Il a été évalué avec deux mécanismes d'accès au médium : basique et RTS/CTS. D'autres travaux ont été proposés pour le 802.11 [20, 63, 64] en se basant sur ce modèle de Bianchi.

2.9.1.2 Modèles analytiques existants pour la norme IEEE 802.15.4

Dans ce qui suit, nous allons présenter les modèles analytiques du mécanisme CSMA/CA de la norme IEEE 802.15.4 [50], que nous estimons intéressants. La présentation des travaux se fera par ordre chronologique.

1) Modèle de Mistic (2004)

Dans [45], les auteurs ont proposé le premier modèle mathématique pour le mode beacon de la norme IEEE 802.15.4, en combinant les chaînes de Markov à temps discrète la théorie des files d'attente (système M/G/1/K), sous l'hypothèse d'un réseau non saturé avec considération des ACK. Les auteurs ont obtenu la distribution de probabilité du délai et du débit.

2) Modèle de Polin (2008)

Dans [58], les auteurs ont présenté un modèle analytique pour la couche MAC de la norme IEEE 802.15.4 où la présentation des CCA a été bien claire sur la Chaîne de Markov. Les auteurs ont considéré deux scénarios du trafic : saturé et non saturé avec ACK dans une topologie en étoile. Le modèle suppose un nombre limité de terminaux et les conditions de canal idéal, ils ont comparé leurs résultats analytiques du débit et de consommation énergétique à des résultats simulés. Il a été démontré que pour les réseaux saturés, il est préférable de choisir une plus grande valeur de backoff. Pour les réseaux non saturés, les

petites valeurs de backoff peuvent améliorer la consommation d'énergie, mais ces économies d'énergie sont très faibles. Il est également montré que, bien que le nouveau mécanisme CSMA / CA diminue considérablement le temps et par conséquent l'énergie dépensée pour écouter le canal, cette consommation d'énergie pendant le CCA représente encore une part importante de la consommation totale d'énergie du système.

3) Modèle de Sahoo (2008)

Dans [60], les auteurs se sont intéressés à étudier l'impact du nombre maximum de retransmission sur les performances du réseau en termes du débit et de la consommation d'énergie. Ils ont considéré une topologie en étoile sous des conditions d'un trafic non saturé avec ACK. Les auteurs ont développé une extension de la Chaîne de Markov existante de deux dimensions à une chaîne de Markov à trois dimensions en incluant un troisième processus stochastique, $r(t)$, qui représente le compteur de retransmission maximal. Les résultats analytiques ont montré que lorsque le taux de données est inférieure à 13pps (paquets par seconde), le débit donne de meilleures performances lorsque la valeur du nombre maximum de retransmission est égale à 3. Mais au delà de 13 pps la valeur du nombre maximum de retransmission qui donne un meilleur débit est 0. La consommation d'énergie des nœuds augmente avec des débits plus élevées. Cependant l'analyse de la consommation d'énergie et du débit montre une faible correspondance avec la simulation.

4) Modèle de Park (2009)

Les auteurs dans [55], ont établi une analyse comparative du protocole 802.15.4 (MAC) en terme de fiabilité, délai et de consommation énergétique. Ils ont proposé un modèle analytique généralisant le mécanisme CSMA/CA slotté en tenant compte des tentatives limitées de retransmission et de l'ACK sous un trafic saturé et non saturé, la topologie du réseau est en étoile avec un coordinateur PAN. Ils ont étudié le comportement d'un seul nœud en utilisant un modèle de Markov tridimensionnels $s(t)$, $c(t)$, $r(t)$, en s'inspirant du modèle de Sahoo [60] où $s(t)$, $c(t)$ et $r(t)$ représentent respectivement l'étage backoff, le compteur backoff et le compteur de retransmission. Les auteurs ont montré que le modèle était précis et fiable en le comparant à des simulations en termes de la fiabilité, le délai et la consommation d'énergie. Ils ont démontré que la distribution du délai dépend principalement des paramètres MAC et des probabilités de collision.

5) Modèle de Park(2013)

Dans [54], Park et al ont élargi leur étude faite en 2009. Ils ont proposé une nouvelle Approche pour minimiser l'énergie, où chaque nœud résout localement un problème d'optimisation. Les auteurs ont proposé d'utiliser l'étude analytique obtenue dans [69], par des chaînes de Markov à trois dimensions, pour résoudre le problème d'optimisation dont la fonction objectif est de minimiser la consommation d'énergie, sous contraintes de délais et de fiabilité, c.a.d., la bonne réception de données en un temps minimal. De plus, les auteurs ont mis en œuvre des scénarios d'expériences sous Contiki OS en utilisant des capteurs Telos B. Les expériences empiriques ont montré que l'approche satisfait considérablement les contraintes de délai et de fiabilité ainsi l'approche garantit une plus longue durée de vie du réseau sous les deux conditions stationnaires et transitoires. Plus précisément, même si le nombre de dispositifs et de configuration du trafic change

brusquement, l'approche proposée permet au système de fonctionner près de son état optimal en estimant le canal occupé et les probabilités d'accès au canal .

2.10 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons essayé de définir la norme IEEE802.15.4, son architecture, ainsi que les principales propositions ayant été faite pour ce qui est des couches MAC.

Nous avons voulu être les plus exhaustifs possibles sur les différentes couches MAC proposées dans la littérature ainsi que sur la couche MAC du standard IEEE 802.15.4.

Nous avons exposé le fonctionnement de la méthode d'accès CSMA/CA utilisée dans IEEE802.15.4, et brièvement expliqué que cette méthode d'accès présente des problèmes de performances principalement dus à la concentration du trafic sur de petits intervalles de temps imposés par le duty cycle. Par la suite, nous avons présenté les limites de la norme IEEE 802.15.4 et son évolution au fil du temps. Nous avons remarqué d'une part, que les modèles mathématiques du mécanisme CSMA/CA ont évolué dans le temps tout en essayant de représenter le mécanisme le plus fidèlement possible. D'autre part, la norme IEEE 802.15.4 a elle aussi évolué. En effet, elle à été amendée à plusieurs reprises et a donné naissance à plusieurs versions.

Par la suite, nous avons réalisé une synthèse sur les principaux travaux existants, ainsi que les Modèles analytiques existants et ceux existants pour la norme IEEE 802.15.4. Dans ce mémoire, nous allons nous intéresser particulièrement à des réseaux CSMA / CA à fente IEEE802.15.4, dans des canaux d'évanouissement et des conditions de trafic saturé. Notre objectif est d'évaluer les performances de cette version.

Pour atteindre notre objectif, nous choisissons de mener notre étude à l'aide de la modélisation analytique stochastique. Nous modélisons analytiquement l'évaluation des performances du CSMA / CA alloué IEEE 802.15.4 dans des conditions de canal d'évanouissement et de trafic saturé. Sur la base de ces modèles analytiques, nous calculons la fiabilité, la consommation d'énergie et le débit. Cette approche nous permettra d'analyser le comportement de ce mécanisme et d'obtenir des résultats exacts. Ceci fera l'objet de chapitre3.

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons proposer un nouveau modèle analytique pour l'analyse des performances du CSMA / CA IEEE 802.15.4 dans des conditions de canal bruité et des conditions de trafic saturé.

3.2 Modélisation de la fonction CSAMA / CA

Dans cette section, nous présentons le modèle analytique proposé pour le protocole CSMA / CA. Dans ce qui suit, nous supposons un nombre fixe de stations N . L'analyse est effectuée dans des conditions de canal bruité et des conditions de trafic saturé.

3.2.1 Hypothèses du modèle

1. N un nombre de n fixe ;
2. Considération des erreurs de transmissions;
3. Conditions de saturation de trafic ;

3.2.2 probabilités de modèle

On peut préciser les probabilités de modèle comme suit :

Probabilistes	Description
τ	Probabilité qu'un nœud tente d'effectuer le CCA1 sur un slot de temps
α	Probabilité que le canal soit occupé dans le CCA1
β	Probabilité que le canal soit occupé dans le CCA2
P	Probabilité de collision
P_e	Probabilité d'erreur de transmission
P_{perdu}	Probabilité d'échec de transmission
P_s	Probabilité transmission réussie conditionnelle

Tab 3.1 : notations probabilistes utilisées pour la modélisation

3.2.3 Paramètres utilisés dans le modèle

On peut définir les paramètres utilisés dans le modèle comme suit :

Paramètre	La description
L	taille du paquet
Ts	Temps de transmission avec succès d'un paquet
Tc	Temps de collision
BER	Le taux d'erreur binaire
N	Nombre de nœuds dans le réseau
M	Nombre maximum de retransmissions
MacMinBE	Minimum de l'exposant backoff
MacMaxBE	Maximum de la longueur de l'exposant backoff

Tab 3.1 : notations paramétriques utilisées pour la modélisation

3.3 Modèle de chaîne de Markov à temps discret

Dans le modèle que nous proposons, le temps est slotté et chaque état représente un nœud dans une slot de temps. A la fin de chaque slot de temps, un événement déclenche une transition vers un autre état. Soit $s(t)$ le processus stochastique représentant l'étage backoff j au temps $t, 0 \leq j \leq m$, où m est le nombre maximum de retransmissions. Soit $b(t)$ le processus stochastique qui désigne la valeur du backoff stage ($0 \dots m$) au temps st , et la valeur du compteur backoff est tirée uniformément de $[0, W_i]$.

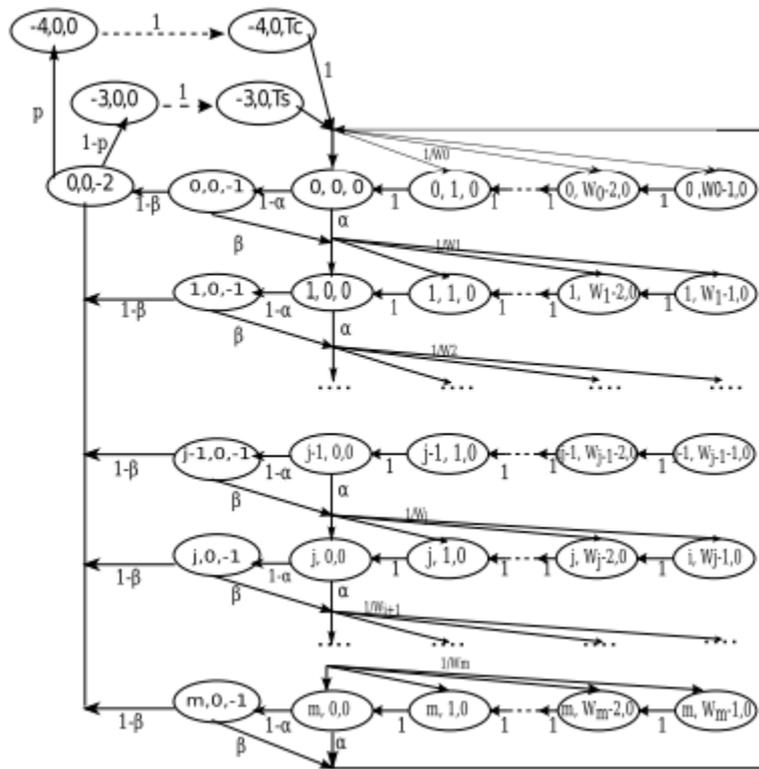


Fig. 3.1 Chaîne de Markov de IEEE 802.15.4 CSMA/CA

W_i dépend de la retransmission à l'étage backoff j et satisfait :

$$W_i \begin{cases} 2^i W_0 & \text{si } i \leq m_b - m_0; \\ 2^{m_b - m_0} & \text{si } m_b - m_0 \leq i \leq m \end{cases}$$

Où $m_b = \text{macMaxBE}$, et $m_0 = \text{macMinBE}$

3.3.1 Probabilités de transition

La transition sur les probabilités dans ce modèle sont décrites comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 P \{ i, k, 0 \mid i, (k+1), 0 \} = 1, & 0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq (w_{i,j} - 1) \\
 P \{ i, k, 0 \mid i-1, 0, 0 \} = \alpha/w_i, & 0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq (w_{i,j} - 1) \\
 P \{ i, 0, -1 \mid i, 0, 0 \} = 1-\alpha, & 0 \leq i \leq m \\
 P \{ 0, 0, -2 \mid i, 0, -1 \} = 1-\beta, & 0 \leq i \leq m \\
 P \{ i+1, k, 0 \mid i, 0, -1 \} = \beta/w_i, & 0 \leq i \leq m, 0 \leq k \leq (w_{i,j} - 1) \\
 P \{ -3, 0, 0 \mid P \{ 0, 0, -2 \} = p, & \\
 P \{ -3, 0, I+1 \mid -3, 0, I \} = 1, & 0 \leq i \leq I_s \\
 P \{ -4, 0, 0 \mid 0, 0, -2 \} = 1-p, & \\
 P \{ -4, 0, I+1 \mid -4, 0, I \} = 1, & 0 \leq i \leq I_c \\
 P \{ 0, K, 0 \mid -3, 0, I_s \} = 1/w_0, & 0 \leq k \leq (w_{i,j} - 1) \\
 P \{ 0, K, 0 \mid -4, 0, I_c \} = 1/w_0, & 0 \leq k \leq (w_{i,j} - 1) \\
 P \{ 0, k, 0 \mid m, 0, 0, \} = /w_0, & 0 \leq k \leq (w_{i,j} - 1)
 \end{array} \right. \quad (2)$$

3.3.2 Probabilités stationnaires

Comme nous pouvons voir dans la Figure 3.1, le graphe qui représente notre modèle de chaîne de Markov pour le LLDN a un espace d'états qui est fini, ainsi la distribution stationnaire existe . Particulièrement, cette probabilité stationnaire est unique, car la C.M est ergodique (irréductible et apériodique).

En effet, la C.M est irréductible car tous les états communiquent entre eux (fortement connexe) et apériodique car chaque état a une période égale à 1.

Laisser $b_{i,j,k}$ être la probabilité constante de l'état (i, j, k) .

$$b_{i,k,0} = \frac{w_i - k}{w_i} b_{i,0,0} \quad (3)$$

$$b_{i-1,0,0}(\alpha + (1-\alpha)*\beta) = b_{i,0,0} \quad (4)$$

$$b_{i,0,0} = x^i b_{0,0,0} \quad (5)$$

Avec $x = (\alpha + (1-\alpha)*\beta)$

$$\sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{w_i-1} b_{i,k,0} = \begin{cases} \frac{b_{0,0,0}}{2} \left[\frac{1-x^{m+1}}{1-x} + w_0 \frac{1-2x^{m+1}}{1-2x} \right] & \text{si } m \leq m_b - m_0 \\ \frac{b_{0,0,0}}{2} \left[\frac{1-x^{m'+1}}{1-x} + w_0 \frac{1-2x^{m'+1}}{1-2x} \right] & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

Avec $m' = m_b - m_0$

$$b_{0,0,0} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\frac{1-x^{m+1}}{1-x} + w_0 \frac{1-2x^{m+1}}{1-2x} + (1-\alpha) \frac{1-x^{m+1}}{1-x} + (1-\alpha)(1-x^{m+1}) \right] & \text{si } m \leq m_b - m_0 \\ \frac{1}{2} \left[\frac{1-x^{m'+1}}{1-x} + w_0 \frac{1-2x^{m'+1}}{1-2x} + (1-\alpha) \frac{1-x^{m'+1}}{1-x} + (1-\alpha)(1-x^{m'+1}) \right] & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

Du point de vu d'une station, τ est la probabilité qu'une station tente le CCA1 dans un slot de temps choisi aléatoirement

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0,0} = \frac{1-2x^{m+1}}{1-2x} b_{0,0,0} \quad (8)$$

$$p = p_c + p_e - p_c p_e \quad (9)$$

$$p_c = 1 - (1 - \tau)^{N+1} \quad (10)$$

$$p_e = 1 - (1 - BER)^L \quad (11)$$

$$\alpha = (1 - \alpha)(1 - \beta) \left[L(1 - (1 - \tau)^{N+1}) + L_{ack} \frac{N\tau(1-\tau)^{N+1}}{1-(1-\tau)^{N+1}} 1 - (1 - \tau)^{N+1} \right] \quad (12)$$

$$\beta = \frac{1-(1-\tau)^{N+1} + N\tau(1-\tau)^{N+1}}{2-(1-\tau)^{N+1} + N\tau(1-\tau)^{N+1}} \quad (13)$$

α est la probabilité de trouver un canal occupé pendant CCA1 et β est la probabilité de trouver un canal occupé pendant CCA2 qui est exprimée en (12) et (13).

Les équations (8), (9), (12) et (13) forment un ensemble d'équations non linéaires. Des moyens de méthodes numériques sont utilisés pour le résoudre. Toutes les probabilités de transition et Probabilités en régime permanent peuvent être obtenues.

3.4 Métriques de performances

Dans cette section, nous dérivons les expressions de fiabilité, de consommation d'énergie et de débit orées par le CSMA / CA non fendu IEEE 802.15.4 dans des conditions d'évanouissement et de trafic de saturation.

3.4.1 Fiabilité

La fiabilité d'un nœud dans CSMA / CA est définie comme la fraction de paquets générés qui ont reçu l'accusé de réception avec succès. La fiabilité du CSMA / CA non fendu est donnée dans l'équation (14).

$$R = 1 - p_{echec} \quad (14)$$

$$\text{Avec } p_{echec} = xb_{m,0,0} = x^{m+1}b_{0,0,0}$$

3.4.2 Débit normalisé

Le débit normalisé d'un ACi donné est calculé comme le rapport du temps occupé par les informations transmises à l'intervalle entre deux transmissions consécutives [1]. Selon cette définition, le débit du nœud si est exprimé comme suit:

$$S = \frac{LP_{tr}P_s}{(1-P_{tr})\delta + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}T_c(1-P_s)} \quad (15)$$

$$\begin{cases} T_s = L + MAC + PHY + IFSperiod + 2T_{CCA} + T_{ACKwait} + T_{ACK} \\ T_c = L + MAC + PHY + timeout \end{cases} \quad (16)$$

Avec T_s le temps de transmission réussi moyen d'une trame et T_c est le temps de collision ou temps d'erreur de transmission. T_s et T_c peuvent être calculés par :

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^{N+1} \quad (17)$$

$$P_s = \frac{N\tau(1-\tau)^{N+1}}{P_{tr}} \quad (18)$$

3.4.3 Energie consommée

$$E = E_{idle} + E_{cca} + E_{trans} + E_{rec} \quad (19)$$

$$E_{idle} = P_{idle} \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^{w_i-1} b_{i,k,0} \quad (20)$$

$$E_{cca} = P_{cca} \sum_{i=0}^m (b_{i,0,0} + b_{i,0,-1}) \quad (21)$$

$$E_{trans} = P_{trans} b_{0,0,-2} + \sum_{i=0}^m b_{-3,0,i} \quad (22)$$

$$E_{rec} = P_{rec} b_{0,0,-2} + \sum_{i=0}^m b_{-4,0,i} \quad (23)$$

3.5 Résultats numériques

Dans cette section, nous présentons les résultats numériques. Nous avons calculé la fiabilité, le débit normalisé et l'énergie consommée. La figure 3.2 montre que la probabilité d'échec de transmission augmente avec l'augmentation du nombre de stations dans les deux cas BER=0 et BER=10⁻³.

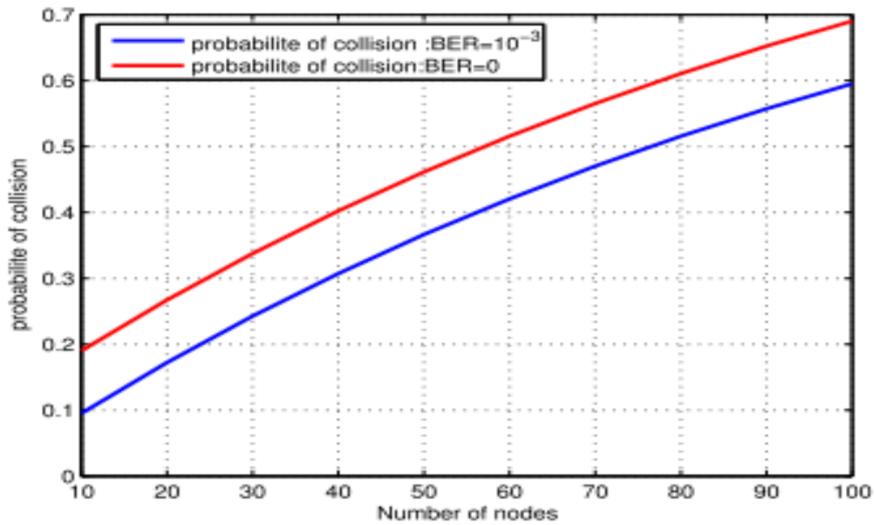


Fig3. 2probabilité d'échec des transmissions.

La figure 3.3 montre les résultats numériques du débit normalisé de CSMA / CA par rapport au nombre de stations dans le réseau avec BER = 0 et BER = dix - 4. Cette figure montre que lorsque le nombre de stations est compris entre 10 et 100, le débit disponible pour le nœud augmente légèrement dans les deux cas avec BER = 0 et BER = dix - 4 .. Le débit nominal est plus élevé lorsque BER = 0 que quand BER= dix - 4.

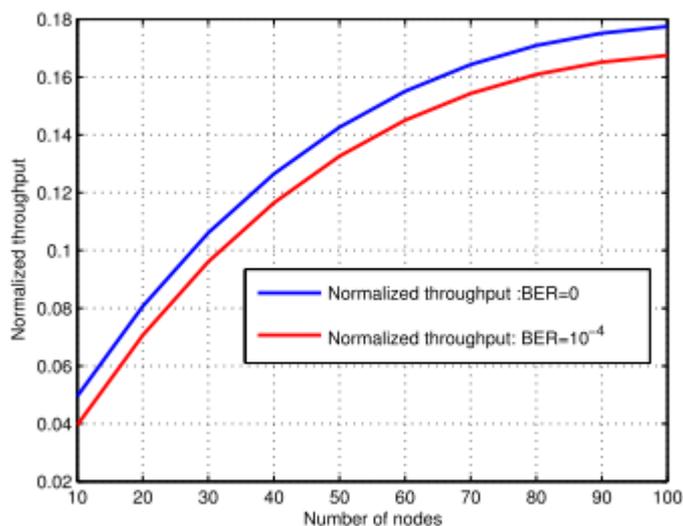


Fig3. 3 Débit normalisé par rapport à la taille du réseau.

La figure 3.4 représente les résultats numériques de la consommation d'énergie du CSMA / CA par rapport au nombre de stations du réseau avec BER = 0 et BER = 3×10^{-3} . Cette figure montre que lorsque le nombre de stations est compris entre 10 et 100, la consommation d'énergie du nœud diminue légèrement dans les deux cas avec BER = 0 et BER = 10^{-4} .. La consommation d'énergie est plus élevée lorsque BER = 0 que quand BER= 10^{-4} .

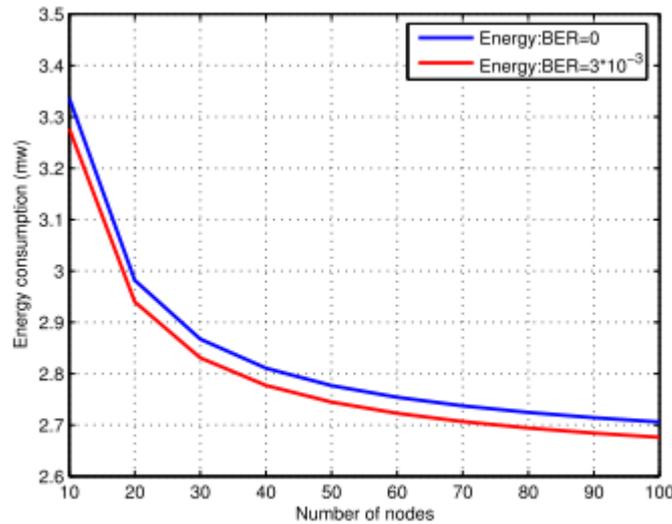


Fig3. 4 Consommation d'énergie par rapport à la taille du réseau.

Les figures 3.5 et 3.6montrent l'effet d'augmenter le BER sur l'énergie consommée et la fiabilité respectivement.

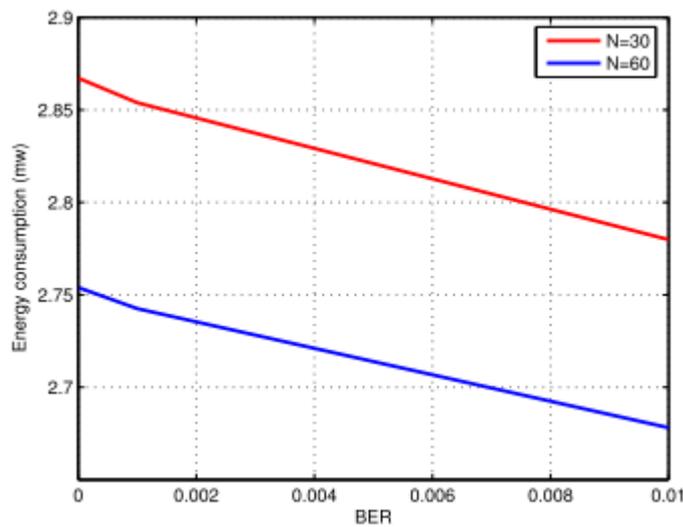


Fig3. 5 Energy consumption versus BER.

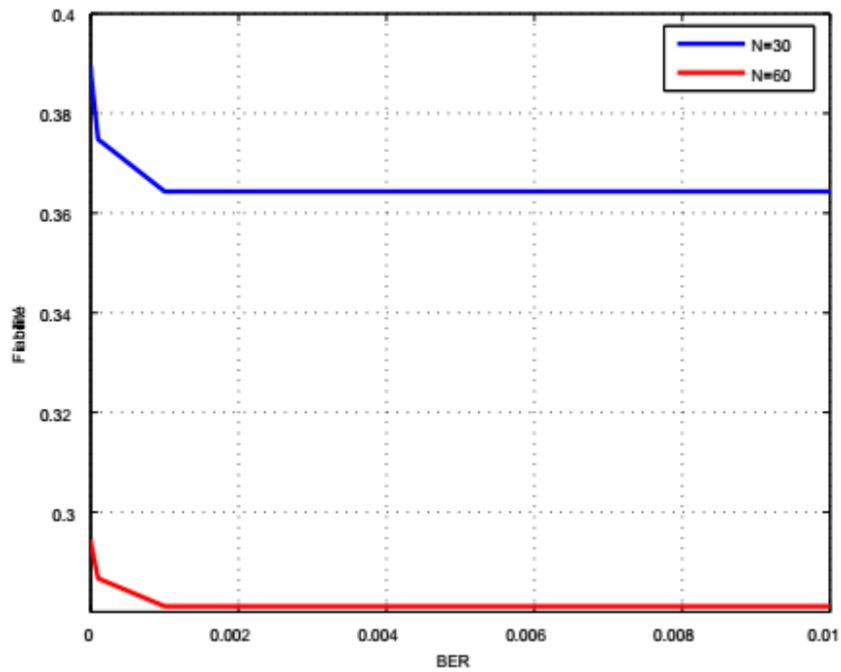


Fig. 3. 6 fiability versus BER.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposer un nouveau modèle analytique pour l'analyse des performances du CSMA / CA alloué IEEE 802.15.4 dans des conditions de canal d'évanouissement et de trafic saturé.

La principale contribution de notre étude est que nous considérons l'impact du canal defading. Dans le cadre de travaux futurs, nous utiliserons des simulations pour valider notre modèle analytique proposé et nous prévoyons un mécanisme amélioré IEEE 802.15.4 CSMA/CA sous les canaux de fading.

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sans fil sont une nouvelle technologie qui a surgi après les grands progrès technologiques concernant le développement des capteurs, des processeurs puissants et des protocoles de communication sans fil. Ce type de réseau composé de certains ou de milliers d'éléments, a pour but la collecte de données de l'environnement, leur traitement et leur dissémination vers le monde extérieur. Nous constatons aujourd'hui une forte utilisation des capteurs dans le domaine industriel, que cela soit pour la surveillance des procédés industriels ou pour l'automatisation des usines. Ce domaine exige des contraintes strictes où il faut garantir que le délai soit inférieur à un certain seuil, sinon le système pourrait être endommagé.

L'objectif de ce mémoire est de proposer un modèle analytique pour les mécanismes MAC de l'IEEE 802.15.4 dédié aux applications industrielles des RCSFs. Ce modèle mathématique permette d'évaluer les performances de cette norme et réaliser une analyse performante. Par ailleurs, nous pouvons estimer l'impact des nouvelles techniques proposées sur les performances du réseau.

Pour atteindre notre objectif, nous avons proposé un modèle mathématique dans la littérature pour le mécanisme à fente IEEE 802.15.4 CSMA / CA sous des canaux d'évanouissement et des conditions de trafic saturées. La résolution du système induit par notre modèle de chaîne de Markov, nous a permis de calculer les métriques de performances suivantes : la fiabilité, l'énergie consommée, le débit, le délai. Dans ce travail de mémoire nous nous sommes concentrés sur cette contribution pour les réseaux de capteurs que nous jugeons la plus pertinente le standard IEEE 802.15.4. Le but de notre travail a été d'étudier en profondeur les mécanismes proposés dans la couche MAC de ce standard afin d'en identifier les principales problématiques. Nous nous sommes rendus compte que le standard IEEE 802.15.4 souffrait d'un certain nombre d'anomalies de conception.

Nous avons présenté les généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, leurs caractéristiques et domaines d'application. Ainsi que les applications industrielles en mettant l'accent sur leurs exigences et défis.

Le standard IEEE 802.15.4, son fonctionnement et les principales problématiques liées à la couche MAC de ce dernier. Le standard propose entre autres le mode Beacon permettant de faire de l'économie d'énergie en permettant aux nœuds de ne garder la radio allumée que durant le temps nécessaire à leurs communications. Ce mode introduit néanmoins son lot de problèmes. En effet nous avons pu constater dans ce chapitre que la couche MAC du standard IEEE 802.15.4 ne propose aucun mécanisme pour se prémunir des interférences entre les différents coordinateurs appartenant à un même réseau, problème très contraignant sachant que tout le Fonctionnement du réseau repose sur la bonne réception des trames Beacons qu'envoient les coordinateurs. Nous avons également montré dans ce chapitre que le standard laisse ouverte la construction de topologies et ne résout pas les problèmes liés à la méthode d'accès.

Nous avons proposé Un nouveau modèle analytique pour l'analyse des performances du CSMA / CA alloué IEEE 802.15.4 dans des conditions de canal d'évanouissement et de trafic saturé. Nous avons dérivé les expressions mathématiques de fiabilité, de consommation d'énergie, de délai moyen pour une transmission de paquets réussie et de débit obtenu par la norme IEEE 802.15.4 à fente CSMA /CA. Nous avons analysé l'impact de la variation de la taille du réseau et du taux d'erreur sur les bits sur la probabilité de défaillance et les métriques étudiées. Les résultats que nous avons proposé dans ce chapitre montrent l'intérêt de ce genre de technique dans les réseaux de capteurs. Les résultats présentés montrent qu'avec cette proposition nous améliorons significativement les performances du standard IEEE 802.15.4 et ceci quelles que soient les valeurs des fenêtres de contention choisies.

Concernant la fiabilité l'énergie et le débit, le mécanisme fournit de très bons résultats. Néanmoins montrent l'effet d'augmenter le BER sur ces derniers vu que la consommation est plus élevé a chaque fois on augmente le BER.

Comme perspectives de recherche, nous proposons les points suivants :

* La majorité des propositions faites pour les réseaux de capteurs partent du Principe que les capteurs ont comme source d'énergie la batterie et le but de ces protocoles est d'économiser cette ressource afin de maximiser la durée de vie du réseau .Avec les capteurs utilisant un module de récupération d'énergie, la quantité d'énergie récupéré est limitée et non disponible tout le temps (sporadique), ainsi le challenge devient non pas la maximisation de la durée de vie du réseau, mais de garantir le fonctionnement de ce dernier avec le peu d'énergie disponible. Plusieurs piste peuvent être étudiées à cet effet:

- Couche MAC:
 - Minimisation des messages de contrôles par exemple la non utilisation des acquittements sous certaines conditions.
 - Contrôle de puissance.
- Couche réseau: introduction de nouvelles métrique prenant en Compte les conditions environnementales (liées à la technique de récupération d'énergie) pour le calcul des routes.

* Trouver le nombre optimal de canaux qui va satisfaire un compromis entre le délai et le débit pour le mécanisme CSMA/CA.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. Brissaud, D. Charpentier, A. Barros et C. Bérenguer, " capteurs intelligents : nouvelles technologies et nouvelles problématiques pour la sureté de fonctionnements ", Maitrise des risques et de sureté de fonctionnement, Lambda-Mu 16, Avignon : France(2008).
- [2] Vernon S. Somerset, Intelligent and Biosensors, Edited by Vernon S. Somerset Intech, January 2010
- [3] A. Montoya, D. C. Restrepo et D.A. Ovalle, Artificial Intelligence for Wireless Sensor Networks Enhancement", InTech, 2010.
- [4] V. A. Kottapalli, A. S. Kiremidjian, J. P. Lynch, E. Carryer, T. W. Kenny, K. H. Law et Y. Lei. Two-tiered wireless sensor network architecture for structural health monitoring. *In* S.-C. Liu, éditeur. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 5057 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 8–19, août 2003.
- [5] Robert Szewczyk, Alan M. Mainwaring, Joseph Polastre, John Anderson et David E. Culler. An analysis of a large scale habitat monitoring application. *In* *SenSys*, pages 214–226, 2004.
- [6] L. Girod D. Estrin K. Yao H. Wang, J. Elson et L. Vanderberge. Target Classification and Localization in Habitat Monitoring. *In* *IEEE Proceedings of the International Conference on Speech and Signal Processing*, pages II–597–II–600, April 2003.
- [7] Md. Asdaque Hussain, Pervez Khan et Kwak Kyung Sup. WSN research activities for military application. *In* *Proceedings of the 11th international conference on Advanced Communication Technology - Volume 1*, ICACT'09, pages 271–274, Piscataway, NJ, USA, 2009. IEEE Press.
- [8] Alberto Cerpa, Jeremy Elson, Michael Hamilton, Jerry Zhao, Deborah Estrin et Lewis Girod. Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology. *In* *Workshop on Data communication in Latin America and the Caribbean*, SIGCOMM LA '01, pages 20–41, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [9] Mani Srivastava, Richard Muntz et Miodrag Potkonjak. Smart kindergarten: sensor-based wireless networks for smart developmental problem-solving environments. *In* *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '01, pages 132–138, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [10] Tia Gao, Dan Greenspan et Matt Welsh. Improving Patient Monitoring and Tracking in Emergency Response. *In* *International Conference on Information Communication Technologies in Health*, July 2005.
- [11] David Malan, Thaddeus Fulford-Jones, Matt Welsh et Steve Moulton. CodeBlue: An Ad

Hoc Sensor Network Infrastructure for Emergency Medical Care. *In MobiSys 2004 Workshop on Applications of Mobile Embedded Systems (WAMES2004)*, June 2004.

[12] XingfaShen, Zhi Wang et Youxian Sun. Wireless sensor networks for industrial applications. *In Intelligent Control and Automation, 2004.WCICA 2004.FifthWorld Congress on*, volume 4, pages 3636 – 3640 Vol.4, june 2004.

[13] V.C. Gungoret G.P. Hancke. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 56(10):4258 –4265, oct. 2009.

[14] IEEE Std. Part 11 : Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. IEEE std, 802.11. Technical report, IEEE, 1999.

[15] S. A. Smerzi, G. Girlando, T. Copani, and G. Palmisano. A ku-band monolithic receiver for DVB-S applications. *IEEE Communications Magazine*, 42(8) :pages 132–139, 2004.

[16] L. Bachiri, D. Aissani, and L. Bouallouche-Medjkoune. Saturation throughput analysis of the IEEE 802.11 e EDCA network with contention free burst under fading channel. *Wireless Personal Communications*, 79(1) :pages 545–564, 2014.

[17] G. Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3) :pages 535–547, 2000.

[18] A. Faridi, M. R. Palattella, A. Lozano, M. Dohler, G. Boggia, L. A. Grieco, and P. Camarda. Comprehensive evaluation of the IEEE 802.15. 4 MAC layer performance with retransmissions. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(8) :pages 3917–3932, 2010.

[19] A. Guitton and N. Hadid. Analysis of channel access delay of slotted CSMA/CA in a WSN. *In Sensor Systems and Software*, pages 83–97. Springer, 2009.

[20] J. He, Z. Tang, H. H. Chen, and Q. Zhang. An accurate and scalable analytical model for IEEE 802.15. 4 slotted CSMA/CA networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(1) :pages 440–448, 2009.

[21] C. Y. Jung, H. Y. Hwang, D. K. Sung, and G. U. Hwang. Enhanced markov chain model and throughput analysis of the slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 under unsaturated traffic conditions. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(1) :pages 473–478, 2009.

[22] F. Cuomo, S. Della Luna, E. Cipollone, P. Todorova et T. Suihko. Topology Formation in IEEE 802.15.4: Cluster-Tree Characterization. *In Pervasive Computing and Communications, 2008.PerCom 2008. Sixth Annual IEEE International Conference on*, pages 276 –281, march 2008.

[23] Francesca Cuomo, EmanueleCipollone et Anna Abbagnale. Performance analysis of IEEE 802.15.4 wireless sensor networks: An insight into the topology formation process. *Comput.Netw.*, 53(18):3057–3075, décembre 2009.

- [24] A. Koubâa, M. Alves, and E. Tovar. Energy and delay trade-off of the GTS allocation mechanism in IEEE 802.15.4 for wireless sensor networks. *International Journal of Communication Systems*, 20(7) :pages 791–808, 2007.
- [25] JianliangZheng et Myung J Lee. A comprehensive performance study of IEEE 802.15.4. *Sensor network operations*, 4:1–14, 2006.
- [26] G. Lu, B. Krishnamachari, and C. S. Raghavendra. Performance evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for low-rate low-power wireless networks. In *IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC)*, pages 701–706, Phoenix, Arizona, USA, 2004.
- [27] J. Misić, S. Shafi et V.B. Misić. Performance of a beacon enabled IEEE 802.15.4 cluster with downlink and uplink traffic. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 17(4):361 – 376, april 2006.
- [28] J. Misić, S. Shafi et V.B. Misić. Maintaining reliability through activity management in an 802.15.4 sensor cluster. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 55(3):779 –788, may 2006.
- [29] G. Anastasi, M. Conti et M. Di Francesco. The MAC Unreliability Problem in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of MSWiM*, 2009.
- [30] M. Martal`o, S. Busanelli, and G. Ferrari. Markov chain-based performance analysis of multihop IEEE 802.15.4 wireless networks. *Performance Evaluation*, 66(12) :pages 722–741, 2009.
- [31] Gang Lu, B. Krishnamachari et C.S. Raghavendra. Performance evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for low-rate low-power wireless networks. In *Performance, Computing, and Communications, 2004 IEEE International Conference on*, pages 701 – 706, 2004.
- [32] A. Koubaa, M. Alves et E. Tovar. GTS allocation analysis in IEEE 802.15.4 for real-time wireless sensor networks. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2006. IPDPS 2006. 20th International*, page 8 pp., april 2006.
- [33] AnisKoubâa, MárioAlves, Eduardo Tovar et André Cunha. An implicit GTS allocation mechanism in IEEE 802.15.4 for time-sensitive wireless sensor networks: theory and practice. *Real-Time Syst.*, 39(1-3):169–204, août 2008.
- [34] J. Mišić, S. Shafi, and V.B. Mišić. Performance of a beacon enabled IEEE 802.15.4 cluster with downlink and uplink traffic. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 17(4):pages 361–376, 2006.
- [35] A. Koubâa, A. Cunha, M. Alves et E. Tovar. TDBS: A Time Division Beacon Scheduling Mechanism for ZigBee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks. *RealTime Systems*, 40(3):321–354, 2008.
- [36] R. Burda et C. Wietfeld. A Distributed and Autonomous Beacon Scheduling Algorithm for IEEE 802.15.4/ZigBee Networks. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference on*, pages 1 –6, oct. 2007.

- [37] PanneerSelvanMuthukumaran, Rodolfo de Paz, RostislavŠpinaret Dirk Pesch. MeshMAC: Enabling Mesh Networking over Ieee 802.15.4 through Distributed Beacon Scheduling. *In Proceedings of AdHocNets*, Niagara Falls, Ontario, Canada, September 2009.
- [38] COuanteur, L Bouallouche-Medjkoune, and D A` issani. Etat d'art sur le mécanisme d'accès du protocole IEEE 802.15. 4. In *MSR 2013-Modélisation des Systèmes Réactifs*, Rennes, France, 2013.
- [39] H. Jeon et Y. Kim. BOP (Beacon-Only Period) and Beacon Scheduling for MEU (Mesh-Enabled USN) Devices. *In Proceedings of ICACT*, February 2007.
- [41] BertaCarballidoVillaverde, Rodolfo De Paz Alberola, Susan Rea et Dirk Pesch. Experimental Evaluation of Beacon Scheduling Mechanisms for MultihopIeee 802.15.4 Wireless Sensor Networks. *In Proceedings of SENSORCOMM*, 2010.
- [42] Eui-Jik Kim et Hyo-Hyun Choi. EBBS: Energy-efficient BOP-based Beacon transmission scheduling for WSNs. *In Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, pages 1–6, sept. 2008.
- [43] P. Park, P. Di Marco, C. Fischione, and K. H Johansson. Modeling and optimization of the IEEE802.15. 4 protocol for reliable and timely communications. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 24(3) :pages 550–564, 2013.
- [44] P. Park, P. Di Marco, P. Soldati, C. Fischione, and K. H. Johansson. A generalized markovchainmodel for effective analysis of slotted IEEE 802.15. 4. In *IEEE 6th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'09)*, pages 130–139, Macau, China, 2009.
- [45] T. R. Park, T. H. Kim, J.Y. Choi, S. Choi, and W. H. Kwon. Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15. 4 slotted CSMA/CA. *Electronics Letters*, 41(18) :pages 1017–1019, 2005.
- [46] R. K. Patro, M. Raina, V. Ganapathy, M. Shamaiah, and C. Thejaswi. Analysis and improvement of contention access protocol in IEEE 802.15. 4 star network. In *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'07)*, pages 1–8, Pisa, Italy, 2007.
- [47] S. Pollin, M. Ergen, S. C. Ergen, B. Bougard, L. V. der Perre, I. Moerman, A. Bahai, P. Varaiya, and F. Catthoor. Performance analysis of slotted carrier sense IEEE 802.15. 4 medium access layer. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(9) :pages 3359–3371, 2008.
- [48] I. Ramachandran, A. K. Das, and S. Roy. Analysis of the contention access period of IEEE 802.15.4 MAC. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 3(1) :pages 4, 2007.
- [49] P. K. Sahoo and J. P. Sheu. Modeling IEEE 802.15. 4 based wireless sensor network with packet retry limits. In *the 5th ACM symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, pages 63–70, Vancouver, Canada, 2008.

- [50] H. Wen, C. Lin, Z. J. Chen, H. Yin, T. He, and E. Dutkiewicz. An improved markov model for IEEE 802.15. 4 slotted CSMA/CA mechanism. *Journal of computer science and technology*, 24(3) :pages 495–504, 2009.
- [51] M. Yazid. Proposition d'un protocole d'accès au médium dans les réseaux locaux sans fil IEEE802.11 à fortes contraintes temporelles. *Magister thesis, Ecole doctorale réseaux et systèmes distribués, Université de Bejaia*, 2008/2009.
- [52] M. Yazid, D. Aïssani, L. Bouallouche-Medjkoune, N. Amrouche, and K. Bakli. Modeling and enhancement of the IEEE 802.11 RTS/CTS scheme in an error-prone channel. *Formal Aspects of Computing*, 27(1) :pages 33–52, 2015.
- [53] M. Yazid, L. Bouallouche-Medjkoune, and D. Aïssani. Enhancement and simulation of the IEEE 802.11 RTS/CTS scheme under noisy channel. In *IEEE World Congress on Computer and Information Technology (WCCIT)*, pages 1–5, 2013.