

M/21.798

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



Mémoire de Fin d'Etude
Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique

Domaine : **Sciences et Techniques**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Systemes de Télécommunications**

Etude des réseaux zigBee : Architecture et Applications

Présenté par : **MATOIYA BOURA**

Sous la direction de : **Mr. SAMIR Ikni**

MAI 2013

Dédicaces

*A mes chers Parents, Pour l'éducation et le Grand Amour dont ils m'ont entouré; pour leur patience. **Je vous aime.***

- ♥ *A mes Chers Frères et Sœurs. Votre soutien m'a été d'une grande importance. **Merci beaucoup.***
- ♥ *A ma Chère Sœur Soimadia, Paix à ton Ame, puisse Allah t'accorde son vaste Paradis.*
- ♥ *A mes Chères Concitoyennes Hadidja, Karianti, Elia et Oumi. Un chocolat blanc Frappuccino vous attend, **my treat.***
- ♥ *A mes chères Amies Meryem et Cherifa, vous avez été d'une grande gentillesse. **Je ne vous oublierai jamais.***
- ♥ *A ma chère Amour Miss Sarah, **I love you.***
- ♥ *A mes petits neveux Hafez, Elabidine. J'espère que vous bossez fort à l'école.*
- ♥ *A toi Mourchid BOURA,*

Je dédie ce travail

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre de mon projet de fin d'études en télécommunications, option systèmes de télécommunications, à l'université 8 mai 1945 de Guelma, Algérie. Il a été réalisé en collaboration avec le laboratoire d'automatique et robotique du département de génie électrique.

A son terme, je tiens à remercier et à exprimer mes profondes gratitude et reconnaissances à mon encadreur Mr Samir IKNI, pour son aide précieuse, sa disponibilité, ses suggestions et conseils qu'il m'a apporté tout au long de ce travail.

Aussi, je voudrais adresser un grand merci à tout le cadre enseignant du département d'Electronique Télécommunications qui a participé efficacement à ma formation de master.

*Enfin, je ne saurais manquer d'exprimer mes remerciements à mes parents et toute ma famille. Malgré la distance, ils ont toujours été à mes côtés, durant mes études et mon séjour à l'étranger. Grâce à eux j'ai pu atteint les objectifs dont je m'étais fixé il y a longtemps. **Dieu merci !!!***

Table des matières

Introduction générale	01
Chapitre I : Etat de l'Art sur la technologie ZigBee	02
I.1 Introduction	03
I.2. Présentation des réseaux de capteurs sans fils	03
I.2.1. Définition et généralité	03
I.2.2. Domaines d'applications	04
I.2.3. Contraintes	05
I.2.4. Qualité des services dans les réseaux de capteurs sans fil	06
I.3. Présentation des standards Zigbee et IEEE 802.15.4	07
I.3.1. Définition	07
I.3.2. Bref historique de la technologie Zigbee/IEEE 802.15.4	09
I.3.3. Evolution de la norme	11
I.3.3.1. 802.15.4-2006	12
I.3.3.2. IEEE 802.15.4a-2007	12
I.3.3.3. ULB (Ultra Large Bande)	13
I.3.4. La Zigbee Alliance	13
I.3.5. Avantages et Inconvénients	14
I.3.5.1. Avantages	14
I.3.5.2. Inconvénients	15
I.3.6. Consommation énergétique	15
I.4. Notion de coexistence dans la bande ISM 2,4GHz	16
I.4.1. Présentation du problème	16
I.4.2. Coexistence avec IEEE 802.11b	17
I.4.3. Coexistence avec Bluetooth	17
I.5. Les domaines d'applications	18
I.6. Implémentations	20
I.7. Conclusion	21
Chapitre II : Les Réseaux ZigBee	
II.1. Introduction	23
II.2. Topologies des réseaux Zigbee	23
II.2.1. Topologie étoile	23
II.2.2. Topologie point à point	24
II.2.3. Autres topologies	25
II.3. Adressage	25
II.4. Etude protocolaire de zigbee/802.15.4	25
II.4.1. Une pile protocolaire en couches	26
II.4.1.1. Le découpage en différentes couches	26
II.4.1.2. Protocoles d'échanges entre deux couches voisines	26
II.4.1.3. Représentation de l'architecture zigbee	27

II.4.2. La couche physique	28
II.4.2.1. Bande de fréquence et services rendus.....	28
II.4.2.2. Modulations et étalement du spectre.....	29
II.4.2.3. Portée radio, puissance d'émission et sensibilité.....	29
II.4.2.4. Format des trames de niveau physique.....	31
II.4.3. La sous-couche MAC.....	31
II.4.3.1. Structure d'une superframe.....	32
II.4.3.2. Structure de trames.....	34
II.4.4. La couche réseau de Zigbee.....	34
II.4.4.1. Création d'un réseau zigbee.....	35
II.4.4.2. Topologie en arbre.....	36
II.4.4.3. Architecture de la couche réseau.....	37
II.4.4.4. Adressage	38
II.4.4.5. principe de routage dans les réseaux zigbee.....	40
II.4.4.6. Ordonnancement des beacons dans un réseau avec arborescence.....	41
II.4.5. la couche application	42
II.5. Sécurité zigbee	43
II.6. Conclusion.....	45

Chapitre III : Simulations

III.1. Introduction.....	47
III.2. Hypothèses	47
III.3. Amélioration du routage.....	47
III.3.1. Description M-ZBR	48
III.3.2. Exemple d'illustration.....	49
III.4. Description et scénarios de la simulation	50
III.4.1. Etude de délai de bout en bout	51
III.4.2. Taux de paquets délivré.....	52
III.4.3. Durée de vie du réseau.....	53
III.5. Analyse de performance du protocole M-ZBR.....	54
III.5.1. Résultats de simulation.....	55
III.6. Conclusion.....	57

Chapitre IV : Test d'application

IV.1. Introduction.....	59
IV.2. Environnement du travail.....	59
IV.3. Description du matériel	59
IV.3.1. Rôle de la carte PICDEM Z.....	60
IV.3.2. La carte daughter sans fil.....	63
IV.3.3. Les protocoles utilisés par la carte PICDEM Z.....	63
IV.4. Résultats de l'expérience.....	65
IV.4.1. Association des nœuds et mécanismes de scan.....	65
IV.4.2. Acquisition de la température.....	70

IV.4.2.1. Réalisation de la carte.....	70
IV.5. Bilan personnel.....	73
IV.6. Problèmes rencontrés.....	74
IV.7. Conclusion.....	75
Conclusion Générale	76

Liste des figures

Figure I. 1 Exemple de Topologie de réseaux WSN.....	04
Figure I. 2 Répartition des canaux IEEE 802.15.4.....	08
Figure I. 3 Logo de la ZigBee Alliance	08
Figure I. 4 position de divers standards	09
Figure I. 5 Différence entre l'alliance ZigBee et le standard IEEE 802.15.4.....	10
Figure I. 6 Historique des standards ZigBee et IEEE 802.15.4.....	10
Figure I. 7 Modules zigbee	14
Figure I. 8 Comparaison mémoire de protocoles réseaux sans fil	14
Figure I. 9 Suivi des patients à domicile en utilisant un réseau ZigBee sans fil	19
Figure I. 10 ZigBee Markets.....	20
Figure II. 1 Représentation de la topologie en étoile.....	24
Figure II. 2 Représentation de la topologie point à point.....	24
Figure II. 3 Communication respectant le protocole normalisé.....	27
Figure II. 4 Pile protocolaire 802.15.4/ZigBee.....	28
Figure II. 5 Rapport entre BER et SNR pour diverses technologies sans fil.....	30
Figure II. 6 Structure du paquet de niveau physique	31
Figure II. 7 Trame MAC générique IEEE 802.15.4.....	32
Figure II. 8 Représentation d'une supertrame IEEE 802.15.4.....	33
Figure II. 9 Exemple d'un réseau maillé zigbee.....	36
Figure II. 10 réseau zigbee en arbre.....	37
Figure II. 11 Structure de la couche réseau proposée par ZigBee.....	38
Figure II. 12 Distribution d'adresses dans la structure d'arbre.....	40
Figure III. 1 Routage hiérarchique et routage hiérarchique amélioré.....	49
Figure III. 2 Réseau de capteurs sans fil considéré.....	51

Figure III. 3 Délais de bout de bout en bout en fonction de la profondeur.....	52
Figure III. 4 Taux de paquets délivrés en fonction de la profondeur.....	53
Figure III. 5 Présentation du réseau	55
Figure IV. 1 La carte PICDEM™ Z	60
Figure IV. 2 La Carte mère PICDEM Z.....	61
Figure IV. 3 Brochage de connecteur J2.....	62
Figure IV. 4 La carte mère PICDEM Z	63
Figure IV. 5 Tableau représentant les modules	64
Figure IV. 6 Fenêtre principale de l'analyseur ZENA	65
Figure IV. 7 Sniffer Microchip, PICDEM Z	65
Figure IV. 8 Architecture du test de réseau	66
Figure IV. 9 Exemple d'une capture reçue par le microchip	67
Figure IV. 10 Mécanisme d'association	68
Figure IV. 11 Mécanisme de réponse d'association	68
Figure IV. 12 Association Request et Réponse	69
Figure IV. 13 Fin du processus d'association des nœuds.....	70
Figure IV. 14 Schéma du montage de la carte.....	71
Figure IV. 15 Schéma block du diagramme	71
Figure IV. 16 Déroulement du programme	72
Figure IV. 17 Organisation du code	72

Liste des tableaux

Tableau I.1. Comparaison Avec d'Autres Standards	11
Tableau I.2. Consommation typique d'un modem 802.15.4 (source Freescale).....	15
Tableau I.3. Caractéristiques affectant la coexistence, en incluant la norme 802.15.4.....	16
Tableau III.1. Instant de mort du premier nœud	53
Tableau III.2. Paramètres de simulation.....	55
Tableau III.3. Résultats de simulation de 7 nœuds.....	56
Tableau III.4. Résultats de simulation de 200 nœuds	56
Tableau IV.1. Nombres d'éléments PICDEM Z	50

Table des sigles et abréviations

Abréviation	Signification
AODV	Ad hoc On Demand Distance Vector
APL	Application Support Layer
BER	Bite Error Rate
BO	Beacon Order
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CAP	Contention Access Period
CFP	Contention Free Period
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
FFD	Full Function Device
GTS	Guaranteed Time Slots
ISM	Industrie Scientifique Médicale
MCPS-SAP	MAC Common Part Sublayer-Service Access Point
MFR	MAC FootR
MHR	MAC HeaderR
MSDU	MAC Service Data Unit
NIB	Network-layer Information Base
NLDE-SAP	Network Layer Data Entity-Service Access Point
NLME	Network Layer Management Entity
O-QPSK	Offset-Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnection
RFD	Reduced Function Device
SO	Superframe Order
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
ZC	ZigBee Coordinator
ZDO	ZigBee Device Object

Introduction générale

Le domaine des télécommunications est en pleine effervescence. Devenu un outil stratégique pour les entreprises, les télécommunications intéressent désormais toute organisation de service. Ils possèdent de nombreuses applications telles que les applications militaires, le contrôle de l'environnement géographique, la domotique ou encore le suivi des biens et services...

Ces applications, bien que très différentes, présentent le besoin commun d'être constituées de réseaux composés de nœuds à faible débit, à très faible coût et à très faible consommation énergétique. Dans cette optique, le standard ZigBee a été introduit. Il ajoute aux couches physiques et liaison définies par la norme IEEE 802.15.4, les couches réseaux et applications. Depuis quelques années de son existence, la technologie zigbee continue à évoluer et confirme son succès dans des domaines variés.

Le travail présenté de ce mémoire s'inscrit de ce contexte et a pour objectif d'étudier les réseaux zigbee : architecture et applications. Il décrit toutes les étapes depuis la définition jusqu'à la présentation du standard, en passant par son étude architecturale et la conception d'une application. Le mémoire est structuré de quatre chapitres :

Le chapitre I fait un état de l'art sur la technologie zigbee. Dans une première partie, nous présentons les réseaux de capteurs sans fils ainsi qu'aux standards zigbee /IEEE 802.15.4. Nous évoquons ensuite les problèmes de coexistence de la norme zigbee avec les autres standards présents dans la bande ISM 2,4 GHz.

Le deuxième chapitre expose les réseaux zigbee, nous justifions tout d'abord, les différentes topologies avant de passer à une analyse architecturale de la pile zigbee. En suite, nous décrivons plus en détail le rôle des différentes couches.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats des simulations pour évaluer les performances dans les réseaux zigbee..

Enfin, le dernier chapitre traite d'une application. La première partie présente tout d'abord le matériel de cette application. La seconde partie décrit ensuite les résultats de ce test. Nous pouvons ainsi conclure, pour terminer ce travail par une conclusion et perspective.

Chapitre I :

*Etat de l'art sur la technologie
zigbee*

I.1 Introduction

Ce premier chapitre se propose de présenter un état de l'art sur la technologie ZigBee de manière générale, tout d'abord en remontant brièvement à ses sources et en citant quelques uns de ses pionniers. Pour cela, une première partie introduira la notion des réseaux de capteurs en précisant leurs principales caractéristiques. Par la suite, une deuxième partie détaillera le standard zigbee, un des premiers standards destiné aux réseaux de capteurs à avoir été normalisé. C'est sur celui-ci que s'est basé notre travail de recherche. Il mettra en avant par la suite les caractéristiques intrinsèques qui en font une technologie si innovante et particulière et les nombreux domaines d'applications pouvant tirer profit de ces performances.

Les avantages, motivation principale de ce travail seront développés plus avant afin de mettre en évidence les intérêts que la problématique propre à ce mode de communication sans fils. Ainsi, l'évolution du standard et les problèmes de coexistence sur un spectre disponible seront détaillés, puis comparés afin de comprendre les paramètres importants affectant les réseaux zigbee. Il sera donc possible de mettre en lumière et de présenter les sujets d'études importants auxquels il reste à répondre afin de permettre aux réseaux zigbee d'être performants que prometteurs.

I.2 Présentation des réseaux de capteurs sans fil (WSN)

I.2.1 Définition et Généralité

Un capteur sans fil est un équipement qui permet de mesurer une grandeur physique dans l'environnement qui l'entoure (température, lumière, pression, etc.), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Le but du déploiement d'un tel réseau est la surveillance d'une zone géographique, et dans certains cas l'action sur celle-ci (on parle alors de réseaux de capteurs-actionneurs) [3].

Contrairement aux réseaux de type cellulaire, les réseaux de capteurs sont construits sur la base de réseaux maillés [7]. C'est-à-dire qu'ils n'utilisent pas nécessairement une configuration en étoile où chaque nœud se trouve en dessous d'un coordinateur. Dans ce type de réseau, il n'y a pas d'infrastructure fixe comme c'est le cas pour les stations de base

des réseaux cellulaires, par exemple. Ici chaque nœud peut prendre part au routage de l'information. La Figure I(a) est un exemple très simple de topologie possible: la topologie plate. Il est aussi possible d'utiliser une topologie hiérarchique où des groupes de nœuds élisent un maître (« Cluster Head ») qui est le seul à pouvoir communiquer avec chacun des maîtres des autres groupes (Figure I(b)).

Un réseau maillé est caractérisé par une dynamique très importante. Les nœuds peuvent être mobiles et suivre un cycle allant de la naissance jusqu'à la mort. Les liens entre les nœuds ne sont donc pas une garantie sur toute la durée de vie du réseau.

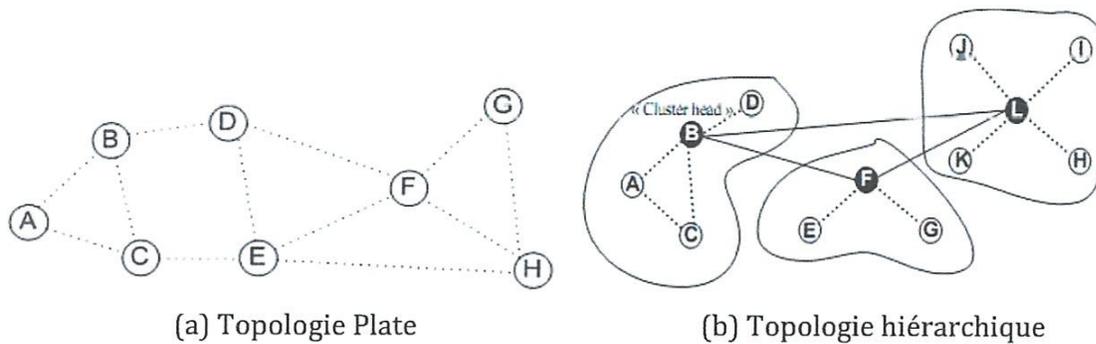


Figure I.1. Exemple de Topologie de réseaux WSN

Un tel réseau doit donc être capable de se réorganiser lui-même, en changeant de topologie, par exemple, pour être capable dès l'initiation de se mettre en place et de fonctionner de manière complètement autonome. Les principales caractéristiques des réseaux de capteurs sont les suivantes :

- Une application connue au départ, entraînant un déploiement optimal du réseau selon les contraintes de cette application.
- Le nombre de nœuds constituant le réseau peut être très important et avec une densité variable au gré des apparitions et disparitions.
- Une énergie disponible pour chaque nœud finie. C'est-à-dire un nœud difficilement rechargeable voire même non rechargeable du tout.

I.2.2 Domaines d'applications

Les domaines d'applications des réseaux de capteurs (WSN : Wireless Sensor Network) sont très variés, du fait notamment de la variété des capteurs.

Dans le domaine militaire, un réseau de capteurs peut être rapidement déployé dans un environnement sans infrastructure, notamment pour surveiller les troupes ou encore détecter des agents chimiques sur le terrain.

Il y a également de nombreuses applications dans le domaine environnemental. En effet, un réseau de capteurs peut permettre :

- de détecter des incendies
- de surveiller des catastrophes naturelles (séismes, éruptions volcaniques)
- de surveiller des phénomènes météorologiques, de détecter de la pollution
- d'améliorer l'agriculture (détection de parasites, mesures de l'irrigation)

Le domaine médical peut aussi être intéressé par exemple pour :

- suivre les patients ou le personnel au sein des bâtiments
- surveiller à distance des données physiologiques (rythme cardiaque)
- le biomédical (rétine artificielle)

On peut également voir des applications domestiques pour :

- l'économie d'énergie en gérant l'éclairage
- les relevés automatiques de capteurs (eau, électrique, gaz)

Enfin des réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour des applications commerciales ou professionnelles pour :

- le génie civil (surveillances des fondations, des bâtiments, des structures)
- la surveillance de trafic
- le contrôle des équipements (éclairage, chauffage, ventilation, climatisation)

I.2.3 Contraintes

Les réseaux de capteurs sans fil forment une branche de recherche à part. En effet, les contraintes liées à ce type de réseaux sont très différentes de celles du domaine classique :

Le premier facteur est celui de l'échelle. Le nombre de capteurs déployés pour étudier un phénomène est généralement de l'ordre de centaines ou de milliers. La densité des nœuds est aussi élevée. Ainsi les algorithmes développés doivent avoir un très bon facteur d'échelle : c'est là la première différence avec les réseaux sans fils classiques où le nombre de stations ne dépasse généralement pas une centaine.

La deuxième contrainte est liée au coût de production. Puisque les capteurs sont déployés par milliers, leurs coûts de production doit rester aussi faible que possible. Ceci induit d'autres contraintes, principalement matérielles (faible capacité de mémoire, faible puissance de calcul) puisque optimiser le coût de production revient à optimiser le coût des composants matériels.

La troisième contrainte qui est, sans doute, la plus importante est celle liée à la consommation d'énergie. La source principale d'énergie d'un nœud est, dans la plupart des cas, une batterie à durée de vie limitée et souvent irremplaçable. C'est la partie communication qui consomme le plus d'énergie. Ainsi les protocoles et les algorithmes doivent prendre en considération le facteur énergie souvent négligé dans les protocoles développés pour les réseaux sans fil classiques (dans ces réseaux l'énergie est supposée infinie). Finalement, s'ajoute à toutes ses contraintes déjà fortement contraignantes le besoin du support de la qualité de service requis par plusieurs applications nécessitant des garanties de bande passante et des délais de transmission bornés.

I.2.4 Qualité de Service dans les Réseaux de Capteurs Sans Fils

A cause de la nature critique et urgente de certaines informations issues des capteurs comme par exemple la détection d'intrusion dans les lieux protégés ou le changement d'état d'un malade ou l'augmentation excessive de la température, il est nécessaire de fournir un support de QoS pour ce type d'applications. Le problème de la QoS peut être abordé dans n'importe quelle couche du modèle OSI. Les travaux actuels sont généralement orientés vers la couche liaison de données et la couche réseau. Les paramètres les plus considérés sont le débit et le délai de transmission.

Synthèse

Les réseaux de capteurs possèdent un large domaine d'applications, synonyme de futurs marchés lucratifs. Ils possèdent leurs propres caractéristiques et leurs propres contraintes. Ils nécessitent donc de relever de nombreux challenges techniques, le plus important étant celui de l'optimisation de l'énergie des nœuds. Le premier standard concernant les réseaux de capteurs à avoir été normalisé est le ZigBee, basé sur la norme IEEE 802.15.4 [8]. C'est une norme pour les Wireless PAN (Personal Area Network) dont le domaine de la domotique constitue la principale application. Une introduction de ce standard sur lequel s'est basé notre travail de recherche est proposée dans le paragraphe suivant.

I.3 Présentation des standards ZigBee et IEEE 802.15.4

I.3.1 Définition

ZigBee est une technologie de réseau sans fil personnel (WPAN) destinée aux systèmes embarqués à très faible consommation énergétique. Elle propose une pile protocolaire propriétaire et légère, déclinable dans plusieurs versions plus ou moins complètes, pour des applications de transferts de données à faibles débits (20 à 250 kbits/s) et de faibles taux d'utilisation du médium.

La fréquence utilisée est le spectre des 2,4 GHz [4] :

- 16 canaux sur la bande 2,4-2.4835 GHz (Monde)
- 10 canaux sur la bande 902-928 MHz (Amérique du Nord)
- 1 canal sur la bande 868-868.6 MHz GHz (Europe)

Dans la bande disponible entre 2.405GHz et 2.48GHz, le standard ZigBee définit donc 16 canaux avec un espacement inter-canal de 5MHz (Figure I.2). Le nombre de canaux disponible étant plus important dans la bande 2.4GHz, c'est elle qui est la plus utilisée. Ce travail de recherche s'est donc concentré sur cette bande de fréquence dont les bornes basses et hautes sont respectivement 2,405GHz et 2,48GHz. Ils sont numérotés de 11 à 26,

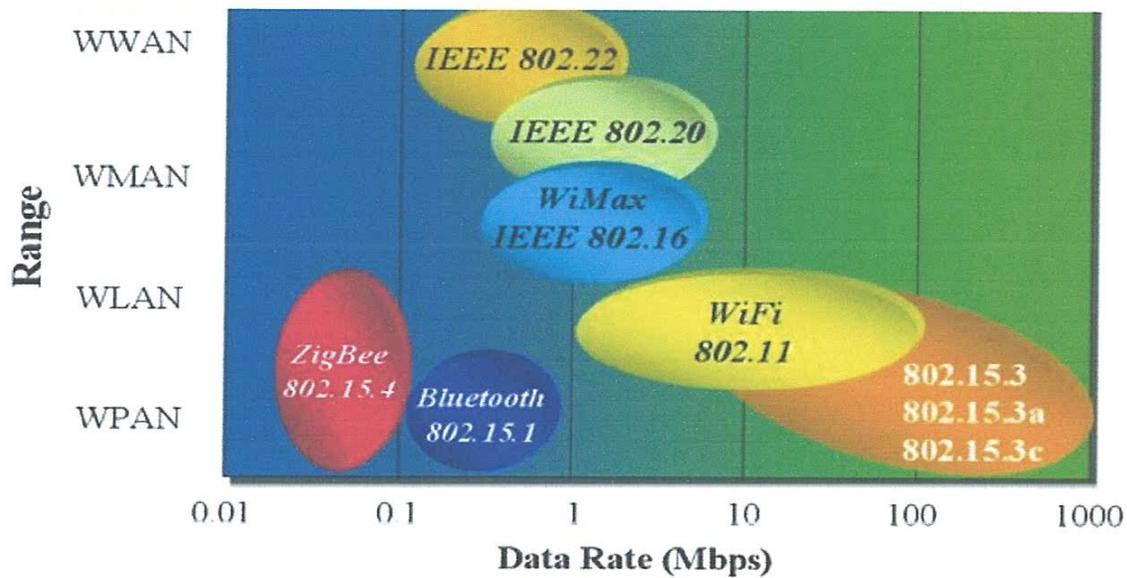


Figure I.4 : position de divers standards [11].

D'autres caractéristiques remarquables de ZigBee sont :

- le faible besoin de mémoire en comparaison à d'autres technologies sans-fil.
- la consommation réduite pour les systèmes fonctionnant sur batterie.
- le coût réduit de l'infrastructure (équipements et installation)
- le grand nombre de nœuds adressables pour un seul réseau, permettant une zone de couverture étendue.
- le fonctionnement autonome, sûr et sécurisé pendant des années sans intervention.
- le protocole standardisé, qui permet à plusieurs vendeurs de rendre leurs produits interopérables sur le marché.

I.3.2 Bref Historique de la Technologie ZigBee/IEEE 802.15.4.

Un amalgame est souvent réalisé entre standard ZigBee et standard IEEE 802.15.4 [8], qui s'appliquent pourtant à des niveaux différents. Le standard ZigBee est une alliance qui profite de la couche physique de radiocommunications définie par le standard IEEE 802.15.4. Le standard ZigBee rajoute une couche réseau. La distinction est illustrée par la Figure I.5.

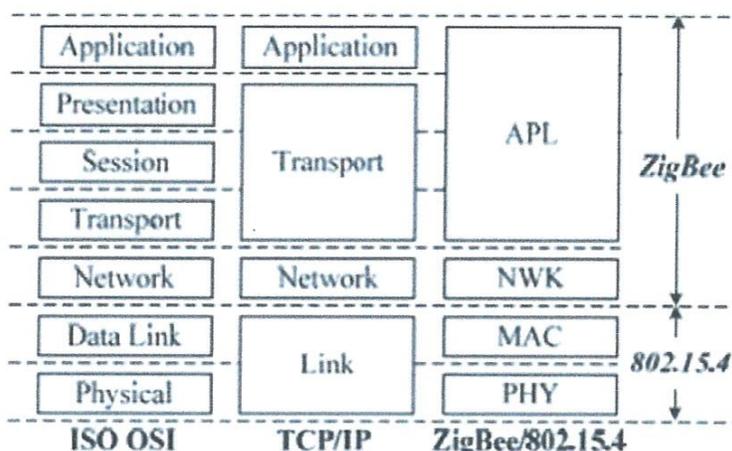


Figure I.5: Différence entre l'alliance ZigBee et le standard IEEE 802.15.4

Le nom ZigBee signifie « *Zig Zag like a bee* ». L'idée initiale du projet ZigBee date de 1998; une première proposition a été présentée courant 2000 puis rapidement une seconde à la fin de la même année. Après une soumission à l'IEEE mi 2001, la ZigBee Alliance a été créée pour développer et promouvoir la norme. La production de modules compatibles fût alors prévue et les premiers produits (puces radio, piles protocolaires, modules intégrés, kits de développement) sont apparus et sont disponibles depuis la fin de l'année 2004 [1]. La Figure I.6 présente l'historique des standards ZigBee et IEEE 802.15.4

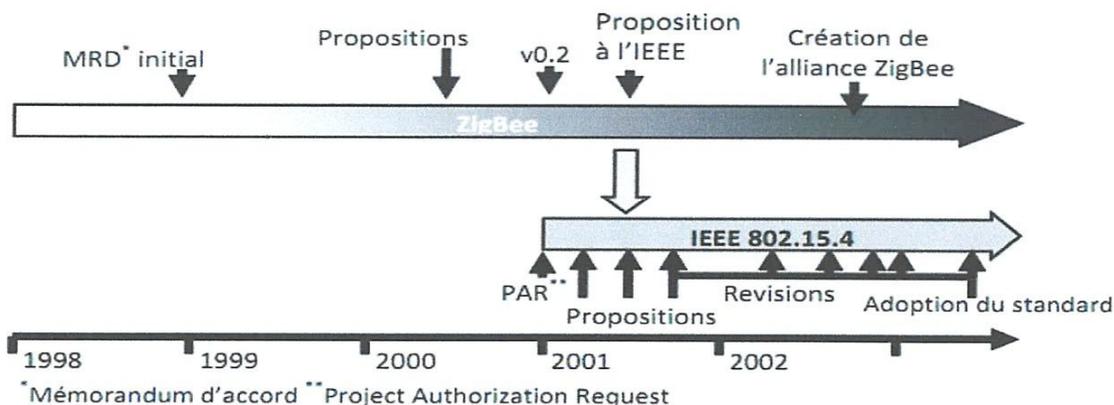


Figure I.6 : Historique des standards ZigBee et IEEE 802.15.4.

Le standard IEEE 802.15.4 est un protocole de paquet dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- La couche physique est simple, elle traduit simplement les trames en bits qu'elle peut ensuite transmettre par ondes radio.
- Un réseau ZigBee possède un coordinateur (nœud puissant) et des nœuds esclaves disposés selon des topologies variables, en étoile ou non, plates ou hiérarchiques.
- La couche MAC est également simple, l'accès des nœuds au canal étant géré à l'aide du protocole CSMA/CA
- Le débit binaire est faible, de 20 à 250 Kbits/s suivant la bande de fréquence utilisée.
- La portée se situe entre 10 et 100 m, dans les bandes de fréquence ISM 800/900MHz et 2.4GHz.
- Ce protocole est défini pour une durée de vie de batterie maximale, chaque capteur devant fonctionner sur une alimentation par pile pendant une durée minimum de 10 ans.

Le Tableau I. 1 compare les paramètres qui viennent d'être décrits avec ceux des standards Wifi et Bluetooth.

Tableau I.1 : Comparaison Avec d'Autres Standards

Caractéristiques	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Autonomie avec pile	Heures	Jours	Années
Complexité	Très grande	Grande	faible
Nombre de nœuds	32	7	64000
Distance (m)	100	10	10-100
extensibilité	oui	non	oui
débit	11Mbit/s	1Mbit/s	250kbit/s

I.3.3 Évolutions de la Norme [1]

La norme initiale IEEE 802.15.4-2003 ratifiée en 2003 a été modifiée et remplacée par une nouvelle norme publiée le 7 juin 2006, IEEE 802.15.4-2006, amendée par la suite à trois reprises. Elle reste actuellement la seule base en cours de validité sur laquelle

s'appuient les amendements. Dans les paragraphes suivants, nous résumons des améliorations proposées par cet ensemble normatif.

I.3.3.1 802.15.4-2006

La mise à jour du standard publiée en septembre 2006 est le résultat des travaux menés par le groupe de travail 15.4b, chargé de renforcer le standard publié en 2003. 802.15.4-2006 propose de nombreux correctifs, mais aussi de nouvelles fonctionnalités. Alors que la norme originelle de 2003 se composait de deux couches physiques, l'une fonctionnant sur la bande des 868/915 MHz (avec des débits théoriques respectivement de 20 et 40 kbit/s) et l'autre sur la bande des 2,4 GHz (avec un débit théorique de 250 kbit/s), la norme de 2006 contient plusieurs nouveautés comme :

- l'augmentation des débits sur la bande des 868/915 MHz, pour la modulation O-QPSK passant respectivement à 100 et 250 kbit/s ;
- la définition de quatre couches physiques différentes. Trois d'entre elles continuent d'utiliser l'étalement de spectre par DSSS (avec la modulation BPSK ou O-QPSK sur la bande 868/915 MHz, et O-QPSK sur la bande des 2,4 GHz) mais une quatrième, dédiée à la bande 868/915 MHz, utilise désormais un étalement de spectre par séquences parallélisées (PSSS) ;
- la proposition de multiples correctifs sur les algorithmes d'accès au médium, notamment sur le report des slots de *backoff* dans le CSMA/CA.

La norme de 2006 reste aujourd'hui le support de base pour les amendements publiés en 2007 et 2009.

I.3.3.2 IEEE 802.15.4a-2007

IEEE 802.15.4a-2007 est un amendement à la norme 802.15.4a-2006 qui spécifie deux nouvelles couches physiques (PHY). Ces deux nouvelles couches introduisent de nouvelles technologies de modulation et constituent un changement radical puisque l'une est basée sur l'hyper étalement de spectre (UWB), l'autre sur l'étalement de spectre par gazouillis (CSS). Toujours pour des réseaux de petite taille, l'introduction de ces nouvelles couches

physiques doit permettre aux équipements IEEE 802.15.4 de pouvoir répondre à de nouvelles applications :

- le transport d'informations à un débit de l'ordre du Mbit/s tout en restant positionné sur des transports à faible dépense énergétique ;
- une portée plus élevée, de l'ordre du 1.5km dans un environnement dégagé;
- la localisation des nœuds du réseau avec une précision de l'ordre du mètre.

I.3.3.3 ULB (Ultra Large Bande)

La technique d'hyper étalement retenu par 802.15.4a est celle du spectre par séquences directes (*Direct Sequence UWB*). Ce mode permet notamment les fonctionnalités de localisation mais également la bonne réception de données, même à un niveau de réception très faible. Plusieurs bandes de fréquences sont précisées dans la norme : en dessous de 1 GHz, entre 3 et 5 GHz, et entre 6 et 10 GHz.

En avril 2009, deux amendements supplémentaires viennent renforcer la norme de 2006 : 802.15.4c et 15.4d. Ces deux amendements sont publiés suite aux travaux menés par les nouveaux groupes de travail 15.4c et 15.4d, qui étudient actuellement les possibilités offertes par l'ouverture de nouvelles bandes dans certaines régions du globe, par exemple en Chine (314-316 MHz, 430-434 MHz et 779-787 MHz) ou au Japon (950-956 MHz).

I.3.4 La ZigBee Alliance

La ZigBee Alliance, dont le slogan est "Wireless Control That Simply Works", a été formée en 1997 par huit compagnies et a pour but de standardiser le protocole ZigBee. Elle comprend actuellement plus de 200 entreprises et continue de s'étendre. La ZigBee Alliance, communauté industrielle développant le protocole ZigBee, propose un classement des objets en 5 types appelés **profils** :

- ZigBee Smart Energy : gestion de l'énergie ;
- ZigBee and RF4CE : télécommandes pour appareils électroniques ;
- ZigBee Health Care : santé ;

- ZigBee Building Automation : contrôle des immeubles ;
- ZigBee Home Automation : contrôle de la maison, domotique ;

Antenne planaire



Platine USB



Antenne filaire



Figure I.7 : Modules zigbee

I.3.5 Avantages et Inconvénients

I.3.5.1 Avantages

La figure I.8 révèle la taille des ressources système en mémoire nécessaires en fonction du protocole réseau sans fil utilisé. Alors que le protocole Wifi nécessite 1 Mo de mémoire vive pour réaliser un nœud du réseau, ZigBee n'a besoin que de 39 à 70 Ko. Ce faible espace mémoire lui permet de déployer un maillage de plus de 65.000 nœuds, là où le Wifi n'en permet que 32, au maximum. Ce maillage à haute densité permet une résilience très importante : si un nœud tombe en panne, le message initial peut arriver à destination via un autre chemin. On reconnaît ici la force d'un système distribué.

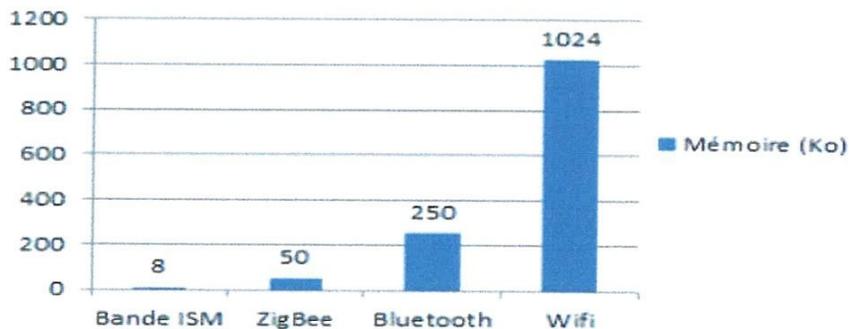


Figure I.8 : Comparaison mémoire de protocoles réseaux sans fil

I.3.5.2 Inconvénients

La faible portée de ZigBee (100m), comme le Wifi peut ne pas convenir à certaines configurations géographiques. Un autre inconvénient est lié au débit de transmission de données environ 250 kbits/s.

I.3.6 Consommation Energétique

Le point fort de ZigBee est sa très faible consommation énergétique, grâce à un mode de fonctionnement appelé doze ou somnolence. Ce mode permet à une entité communicante ZigBee de consommer très peu d'énergie ($100\mu\text{W}$) tout en permettant de passer en mode opérationnel en très peu de temps ($300\ \mu\text{s}$, cf. tableau I.2), contrairement à d'autres WPAN comme Bluetooth par exemple.

Bien que les progrès de l'électronique en terme de consommation énergétique soient sensibles ces derniers temps (possibilités accrues et rapides de mise en veille, baisse significative des courants de fuites dans le silicium, etc.), les bonnes performances de ZigBee sur ce plan sont essentiellement dues au mode somnolence, qui implique par conséquent une faible utilisation protocolaire du médium. Un réseau ZigBee utilisé en continu, par exemple pour une application de type streaming audio consommera autant d'énergie que tout réseau sans fil classique, à puissance d'émission et débit équivalents.

A titre d'exemple, la consommation énergétique d'un modem ZigBee type fabriqué par Freescale est donnée dans le tableau I.2. Le modem considéré est le MC13192. Notons que le mode de fonctionnement normal du module est le mode repos, et de ce fait, les temps de basculement sont donnés par rapport à cet état de référence [1].

Tableau. I.2 : Consommation typique d'un modem 802.15.4 (source Freescale)

Mode	Consommation	Temps vers « repos »
Off		23 ms
Hibernation	3 μA	18 ms
Somnolence	☺ 40 μA ☺	☺ 332 μs ☺
Repos	1 mA	
Émission	34 mA	144 μs
Réception	37 mA	144 μs

I.4 Notion de Coexistence dans la Bande ISM 2.4 GHz

Le standard ZigBee se trouvant dans une bande ISM (Industriel, Scientifique, et Médical), est soumis au problème de coexistence. Nous allons donc dans ce paragraphe, introduire ce problème, en présentant dans une première partie les différents standards présents dans la bande ISM 2.4 GHz avant d'étudier plus en détail dans une deuxième partie le cas du standard WLAN et WPAN.

I.4.1 Présentation du problème

La bande ISM 2.4 GHz est une bande libre, non soumise à des réglementations nationales et qui peuvent être utilisées librement (gratuitement et sans autorisation) pour des applications industrielles, scientifiques et médicales. Les seules obligations à observer sont la puissance d'émission et les excursions en fréquence, ou la perturbation des fréquences voisines. Les principaux standards présents dans cette bande sont les suivants :

- IEEE 802.11b: WLAN
- IEEE 802.15.1: Bluetooth
- IEEE 802.15.3: WPAN haut débit.

Le Tableau I.3 résume pour chacun d'entre eux, les principales caractéristiques affectant la coexistence, en incluant le standard IEEE 802.15.4.

Tableau I.3. Caractéristiques affectant la coexistence, en incluant la norme IEEE 802.15.4.

Standard	Sensibilité	Puissance d'émission	Bande passante
WLAN	-76dBm	14dBm	22MHz
Bluetooth	-70 dBm	0dBm	1MHz
WPAN	-75dBm	8dBm	15MHz
ZigBee (IEEE802.15.4)	-85 dBm	0dBm	3MHz

Par définition, un système zigbee doit pouvoir fonctionner sur des fréquences déjà allouées mais à des niveaux si bas qu'ils sont assimilables à du bruit blanc pour les

systèmes partageant le même spectre. Cependant, des études doivent être menées afin de savoir justement en deçà de quel seuil les perturbations sont négligeables.

Tous les standards ne sont pas abordés. Nous nous sommes concentrés sur la coexistence avec le standard IEEE 802.11b et celui de Bluetooth (IEEE 802.15.1). C'est en effet sur ces deux standards, de part leurs largeurs de bande et de leurs importantes présences dans les lieux publiques que privés, semblent les plus gênant.

I.4.2 Coexistence avec IEEE 802.11b

Le standard IEEE 802.11b possède une bande passante totale de 22MHz beaucoup plus large que celle du standard IEEE 802.15.4 (3MHz). Il peut donc être considéré comme du bruit blanc. De plus, la technologie Wi-Fi, l'accès au canal de fréquence de type CSMA/CA, similaire à ZigBee, permet de donner, à chaque fois qu'un paquet de données doit être envoyé, la même chance aux deux réseaux qui pourraient exister simultanément dans le même environnement.

I.4.3 Coexistence avec Bluetooth

Utilisant la technique de saut de fréquence durant la transmission, une communication basée sur le protocole Bluetooth ne peut perturber statistiquement que très rarement une communication ZigBee qui, elle, reste sur un canal donné.

Le protocole ZigBee se présente en lui-même comme un très faible perturbateur sur la bande de fréquence 2,4 GHz, grâce à la nature des applications auquel il s'adresse :

- Envois de petites quantités de données
- Transmissions peu fréquentes de paquets (par rapport à Bluetooth qui est utilisé pour du flux audio temps réel), ce qui fait de lui un très bon citoyen sur la bande de fréquence des 2,4 GHz.

I.5 Les domaines d'applications [1]

En raison de ses caractéristiques et de son positionnement par rapport aux autres standards de communication sans-fil locaux tels que Bluetooth ou Wi-Fi, ZigBee est présente sur de nombreux domaines en expansion. On regroupe généralement les applications de Zig-Bee en sept grandes catégories :

- **L'automatisation des immeubles:** la sécurité, le contrôle d'accès, l'éclairage, le chauffage...
- **Le médical:** le suivi et la surveillance continue de patients à distance.

Penser à un patient qui séjourne dans sa maison, mais qu'il est important que son médecin surveille son rythme cardiaque et sa pression artérielle en continu. Dans ce système, La pression artérielle d'un patient et la fréquence cardiaque, par exemple, peuvent être mesurées par des appareils portables. Le patient porte un dispositif ZigBee qui s'interface avec un capteur qui recueille des informations liées à la santé tels que l'hypertension artérielle sur une base périodique. Puis les données sont transmises sans fil à un serveur local, tel qu'un ordinateur personnel à l'intérieur de la maison du patient, où l'analyse initiale est effectuée. Enfin, l'information vitale est envoyée à l'infirmière du patient ou du médecin par l'intermédiaire de l'Internet pour une analyse plus approfondie.

La passerelle ZigBee assure le rôle d'interfaçage entre le réseau ZigBee et un autre réseau en utilisant une norme différente. Le réseau ZigBee sans fil est utilisé pour recueillir des renseignements sur les patients localement à l'intérieur d'une pièce, l'information peut-être transmise sur Internet à une station de surveillance.

Dans ce cas, la passerelle ZigBee implémente à la fois le protocole ZigBee et le protocole Internet pour être en mesure de traduire les paquets ZigBee au format paquet de protocole Internet, et vice versa.

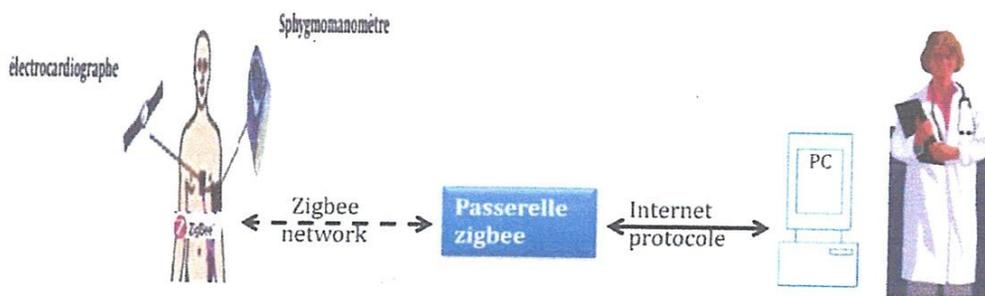


Figure I.9. Le suivi des patients à domicile en utilisant un réseau ZigBee sans fil

Les informations médicales contrôlées en continu peuvent également être enregistrées sur un téléphone et transmises au médecin traitant. En cas d'urgence (absence de réponse du patient ou signes vitaux alarmants par exemple), l'appareil portable peut être programmé pour alerter immédiatement les services d'urgence.

Ce système pourrait aider les hôpitaux à améliorer les soins aux patients et soulager le surpeuplement hospitalier en leur permettant de surveiller les patients à la maison.

- **Le contrôle industriel:** la gestion des biens, des stocks, la gestion de l'énergie, la surveillance des risques et de l'environnement, les applications de contrôle/commande industrielles, les télérelevés.
- **Les télécommunications:** le m-commerce (commerce mobile), les infos services, les interactions des objets, liaisons point-à-point et relais pour les systèmes de transmission coopératifs et/ou hétérogènes.
- **L'électronique grand public:** le pilotage et le contrôle à distance des TV à l'aide des télécommandes. La télécommande zigbee est conçue pour commander des appareils à des très grandes distances. Elle ne contraint pas le consommateur à diriger la commande vers son appareil. Elle offre un contrôle flexible à partir des pièces voisines et permet une communication bilatérale unique entre la commande et l'appareil vers lequel elle est dirigée. Elle élimine les difficultés de direction. Notons que la limitation des télécommandes (IR) est qu'elles ne fournissent qu'une communication unidirectionnelle entre la télécommande et l'appareil de divertissement. En outre, les signaux infrarouges ne pénètrent pas les murs et les autres objets.

- **Le PC et ses périphériques:** souris, clavier, joysticks...
- **La domotique:** la gestion du chauffage, de l'éclairage, des alarmes. Avoir des maisons entièrement automatisées représente aujourd'hui une certaine utopie mais ZigBee espère fournir l'avancée technologique afin de répondre à ce problème.



Figure I.10 : ZigBee Markets

I.6 Implémentations

La technologie ZigBee prévoit deux types d'entités [4] :

1. Les entités complètes, ou **FFD** (Full Function Device):
2. Les entités réduites ou **RFD** (Reduce Function Device):

Les FFD implémentent la totalité de la spécification. Ils ont 3 rôles possibles : Coordinateur PAN, routeur ou dispositif terminal et peuvent communiquer avec FFD et RFD. Généralement, le FFD sera alimenté par une source non contrainte énergiquement.

I.7 Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'introduire la notion de réseaux de capteurs, domaine en pleine expansion en raison de la multiplicité des applications auxquelles il peut conduire. Le ZigBee est un des premiers standards de ce domaine à avoir été normalisé. Il définit les couches réseaux et applications en se basant sur la norme IEEE 802.15.4 pour les couches physiques (PHY) et de liaison (MAC). Cependant, une étude des problèmes de coexistence dans la bande ISM 2.4 GHz a été présentée.

A partir des études préliminaires présentées dans ce chapitre d'introduction, nous sommes maintenant en mesure d'aborder la première partie de l'étude : les réseaux ZigBee.

Chapitre II :

Les Réseaux ZigBee

II.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons été amenés à présenter un état de l'art sur la technologie ZigBee. Nous avons, à cette occasion, introduit la notion de réseaux de capteurs et avons mis en lumière ses principales caractéristiques.

Le présent chapitre expose les réseaux ZigBee. Le but principal d'un réseau ZigBee est d'offrir un moyen de communication radio simple et robuste, entre des équipements électriques et électroniques généralement de petite taille, très souvent autonomes énergétiquement, et ayant des besoins de communication très ponctuels. Bref, l'objectif principal d'un réseau est de relier et permettre l'exploitation à distance des systèmes informatiques à l'aide des télécommunications.

Ainsi, ce chapitre traitera les réseaux zigbee. Les différentes topologies des réseaux sans fil zigbee envisageables ainsi que les caractéristiques principales sont évoqués : mécanismes d'accès au médium, routage et sécurité.

II.2 Topologies des Réseaux ZigBee

Dans un réseau zigbee, chaque nœud doit s'identifier avant de rejoindre le réseau. La norme IEEE 802.15.4 prévoit deux topologies : Étoile ou point à point [4]. Ces deux topologies sont représentées dans les figures II.1 et II.2. Au dessus de 802.15.4, la couche réseau de ZigBee permet la création de réseaux plus complexes comme les réseaux maillés ou arborescents grâce à un routage automatique des paquets de niveau réseau.

II.2.1 Topologie étoile

Dans la *topologie en étoile*, illustrée à la figure II.1, chaque périphérique du réseau peut communiquer uniquement avec le coordinateur de PAN. Les communications directes entre entités RFD sont impossibles. Notons que le rôle central du coordinateur implique de plus fortes dépenses énergétiques ; un coordinateur devra donc généralement prévoir une source d'alimentation non contrainte (batterie).

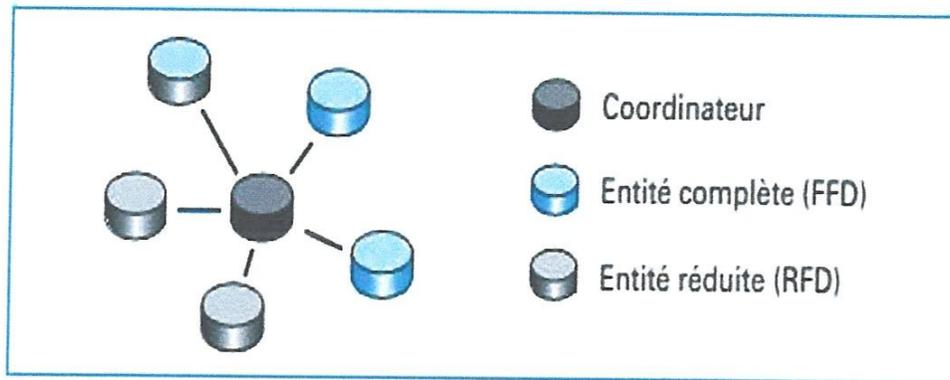


Figure. II.1. Représentation de la topologie en étoile

II.2.2 Topologie point à point

Dans une topologie *point à point*, chaque FFD peut communiquer directement avec un autre FFD s'ils sont suffisamment rapprochés pour établir un lien de communication réussie. Toute FFD sur le réseau peut jouer le rôle du coordinateur de PAN. Dans cette topologie, on retrouve un coordinateur unique comme dans la topologie étoile. Son rôle est de tenir à jour une liste des participants au réseau et de distribuer les adresses courtes. Tous les dispositifs qui participent à relayer les messages sont des FFDs puisque les RFDs n'en sont pas capables. Cependant, un RFD peut faire partie du réseau et de communiquer uniquement avec un coordinateur ou un routeur.

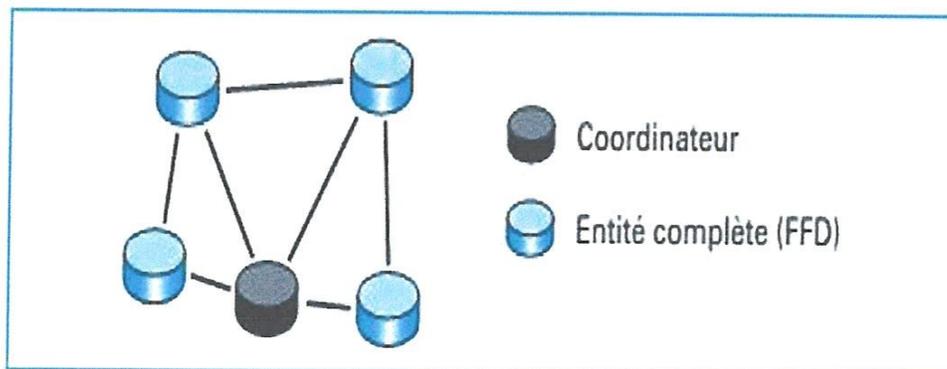


Figure. II.2. Représentation de la topologie point à point

II.2.3 Autres topologies

Un réseau peer-to-peer peut prendre différentes formes, en définissant des restrictions sur les dispositifs qui peuvent communiquer les uns avec les autres. La technologie ZigBee propose une couche réseau permettant de créer facilement d'autres topologies grâce à des algorithmes de routage automatique. S'il n'y a pas de restriction, le réseau point à point est connu comme une topologie maillée (mesh) ou arbre [4].

Nous aborderons ces techniques plus loin, dans la partie consacrée à la couche réseau.

II.3 Adressage

Zigbee utilise deux types d'adressage :

- Une adresse 64 bits, soit 8 octets, qui peut être comparée à une adresse IP sur l'Internet, adresse source + adresse destination (topologie pairs à pairs).
- Sur une topologie en étoile, une adresse plus courte, sur 16 bits, est utilisée (ID du réseau + ID du nœud) une fois le réseau en place ($2^{16}=65536$ nœuds possibles). En cas de besoin supplémentaire, il est tout à fait envisageable de créer un système de passerelle sur un nœud.

Voici quelques caractéristiques générales du réseau [6] :

- Offre trois types de débits : 250 Ko/s, 40 Ko/s et 20 Ko/s.
- Supporte les topologies en étoile, paire à paire et hiérarchique.
- Distance maximale entre deux nœuds : 100 mètres.
- Adresses MAC courtes (16 bits) ou étendues (64 bits).
- Permet l'allocation de tranches de temps garanties (GTS) pour les applications nécessitant des garanties de délais déterministes.
- Utilise le protocole CSMA/CA pour l'accès partagé au canal de transmission.
- Implante les acquittements au niveau MAC pour maximiser la fiabilité.

II.4 Etude Protocolaire de ZigBee/802.15.4

II.4.1 Une pile protocolaire en couches

La pile protocolaire zigbee est représentée en figure II.4. Comme pour la plupart des technologies réseaux, l'ensemble des protocoles décrits par la norme ZigBee est représentable sous la forme d'une pile protocolaire découpée en plusieurs couches. Ce découpage permet de séparer clairement les différentes tâches; l'identification des spécialités des différents acteurs et des différents métiers de la conception réseau est ainsi rendue plus claire [5].

II.4.1.1 Le Découpage en Différentes Couches

La pile proposée par l'IEEE et la ZigBee Alliance suit les recommandations de l'ISO (International organization for Standardisation) en terme de séparation des rôles attribués aux différentes couches. Comme cela a été dit précédemment, cette pile reprend les couches 1 et 2 normalisées dans la norme 802.15.4 et ajoute ses propres couches supérieures.

Les sections suivantes présentent une description plus précise du rôle et des caractéristiques de chaque couche.

II.4.1.2 Protocole d'échange Entre deux Couches Voisines

Les échanges de messages entre deux couches mitoyennes se font selon le principe classique du service de niveau n , service assuré par la $n^{\text{ième}}$ couche de la pile. Pour accéder à ce service, la couche immédiatement supérieure ($n + 1$) peut accéder au Point d'Accès de Service (SAP) de niveau n .

Pour être accessible, un SAP propose un jeu de primitives propre à ses capacités (par exemple : scanner le médium radio 2,4GHz, créer une connexion au réseau, envoyer des données). Selon ses besoins, la couche supérieure appelle les primitives qu'elle souhaite dans l'ordre imposé par son protocole.

Pour s'échanger des messages, deux couches mitoyennes disposent de quatre types de primitives :

1. **Request** : demande effectuée par le service local de niveau $n + 1$ au SAP de niveau n .
2. **Indication** : la demande qui vient d'être faite par le request est acheminée jusqu'au nœud destinataire par le réseau ; le SAP distant de niveau n le transmet à la couche $n + 1$.
3. **Response** : la couche distante de niveau $n + 1$ répond en envoyant un message à son entité paire. Pour être acheminé par le réseau, le message est passé au SAP de niveau n .
4. **Confirm** : le SAP local de niveau n transmet cette réponse au service de niveau $n + 1$, qui avait initié la requête.

La figure II.3 illustre ce fonctionnement.

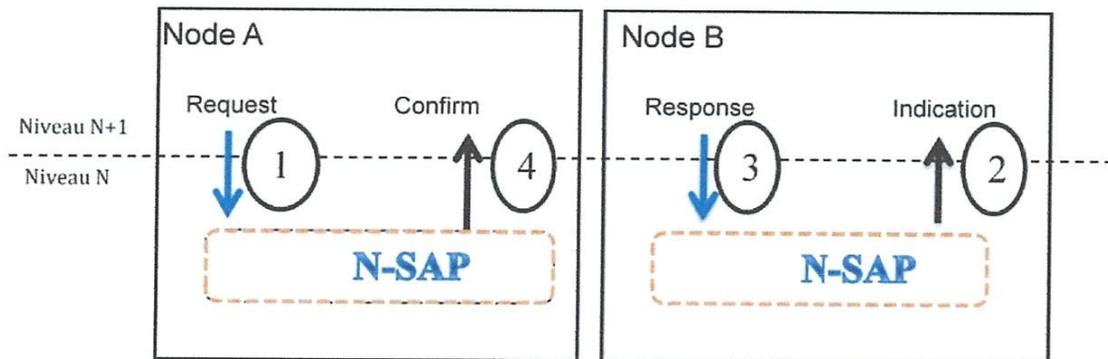


Figure. II.3. Communication respectant le protocole normalisé [5].

II.4.1.3 Représentation de l'architecture ZigBee

Comme nous l'avons dit précédemment, l'architecture de la pile ZigBee est composée de 4 couches sur les 7 du modèle OSI : Physique (PHY), Liaison (MAC), Réseau (NWK) et Application (APL). Chacune de ses couches rend un ensemble de services spécifiques à la couche supérieure au travers d'interfaces appelées "Services Access Point" (SAP).

ZigBee utilise deux types de SAP par couches: un pour les données, et un pour le management.

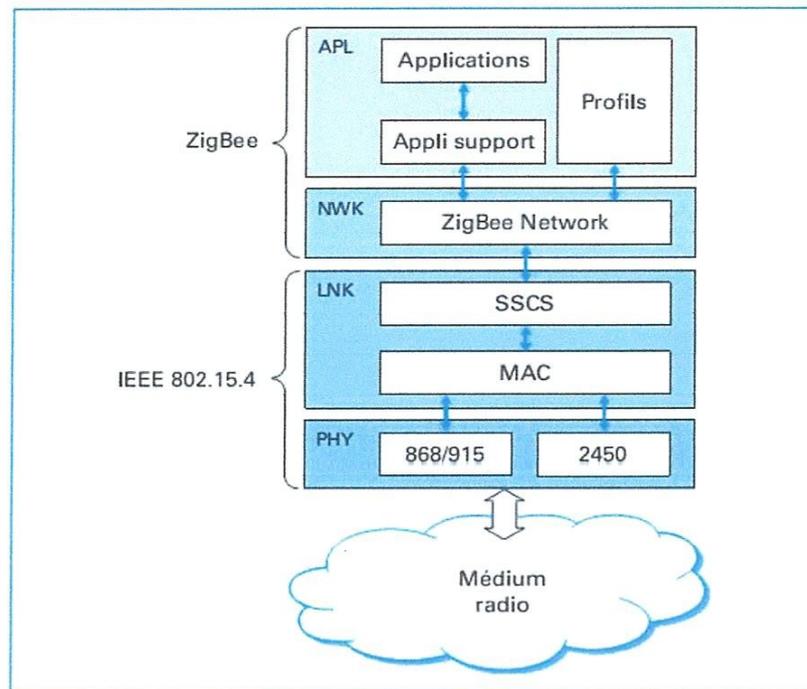


Figure II.4. Pile protocolaire 802.15.4/ZigBee [1]

II.4.2 La couche physique

II.4.2.1 Bandes de fréquences et services

Les principales fonctions remplies par la couche physique sont les suivantes :

- l'activation et la désactivation de la transmission radio
- la communication des canaux
- test de disponibilité du canal
- transmission et réception de données du support physique

La norme offre deux modes de transmissions dans la couche physique. Le premier opère autour de la fréquence 2.4Ghz, le deuxième dans les fréquences 868/915 Mhz. Les deux sont basés sur la technique DSSS. Ils doivent coexister dans un équipement IEEE 802.15.4.

Au total, 27 canaux (numérotés de 0 à 26) sont répartis sur ces trois bandes, cette diversité en terme d'utilisation du spectre radiofréquence permet à la technologie de répondre aux

nombreuses réglementations et d'être utilisable sur toutes les régions du globe. Soit k , le numéro de canal compris entre 0 et 26.

On peut alors obtenir la fréquence de chaque canal ainsi [4] :

- F_c (MHz) = 868,3 MHz, pour $k=0$
- F_c (MHz) = 906 + 2 * ($k-1$), pour $k=1, 2 \dots 10$
- F_c (MHz) = 2405 + 5 * ($k-11$), pour $k=11, 12 \dots 26$.

II.4.2.2 Modulations et étalement de spectre [1]

La norme 802.15.4 met en œuvre une modulation à spectre étalé. Une modulation utilisant une méthode unique d'étalement de spectre séquentiel (DSSS) permet d'améliorer l'immunité aux interférences et aux multi-trajets, en sacrifiant quelque peu les performances en terme de débit. De plus, grâce au codage réalisé par la séquence pseudo-aléatoire, aussi appelée PN-codes, qui permet de réaliser l'étalement, la confidentialité des échanges est améliorée. Cette technique ne garantit pas néanmoins des propriétés optimales de confidentialité et d'authentification ; une partie de la couche liaison effectuera cette tâche.

La couche PHY868/915 est relativement simple et basique : les symboles sont binaires, grâce à l'emploi d'une modulation BPSK et un débit peu élevé (20 kbits/s pour le 868 MHz, 40 kbits/s pour le 915 MHz). En revanche, la couche PHY2450 propose une modulation à codage orthogonal plus complexe, O-QPSK, qui permet une efficacité plus élevée et un débit plus intéressant (250kbits/s).

II.4.2.3 Portée radio, puissance d'émission et Sensibilité

L'IEEE 802.15.4 prévoit une portée classique de quelques dizaines à quelques centaines de mètres suivant l'environnement considéré.

Dans ce domaine, l'IEEE 802.15.4 spécifie que la sensibilité des récepteurs doit être au minimum de - 85 dBm sur la bande 2,4 GHz et de - 92 dBm sur les bandes 868 et 915 MHz. La portée radio dépend non seulement de la sensibilité des récepteurs mais également de la puissance d'émission. Le standard 802.15.4 impose que chaque transmetteur puisse disposer d'une puissance de sortie de 1 mW (0 dBm), mais laisse la possibilité, suivant les

applications, de diminuer ou d'augmenter cette valeur (dans la limite des régulations en vigueur dans chaque région).

Notons que de part la robustesse de la couche physique, les portées d'un transceiver 802.15.4 sont comparables à celle d'un transceiver 802.11, mais avec une puissance d'émission plus faible : à rapport signal sur bruit (SNR) égal, 802.15.4 dispose d'un taux d'erreur bit (BER) meilleur que les autres technologies sans fil proposées par l'IEEE, comme l'illustre le graphe de la figure II.5 [11].

Notons que comme pour toutes les technologies de réseau sans fil, la portée effective d'un transceiver 802.15.4 est très liée à sa puissance d'émission. Certains modules sont dotés d'un étage amplificateur en sortie HF et/ou d'un amplificateur à faible bruit en entrée, ce qui permet d'étendre considérablement la portée radio.

Pour des applications où la latence n'est pas un facteur critique, les réseaux maillés offrent une excellente possibilité d'augmenter la portée globale d'un système, par l'utilisation de nœuds capables d'agir en tant que répéteurs, donc ne consommant que la puissance nécessaire pour atteindre leurs plus proches voisins.

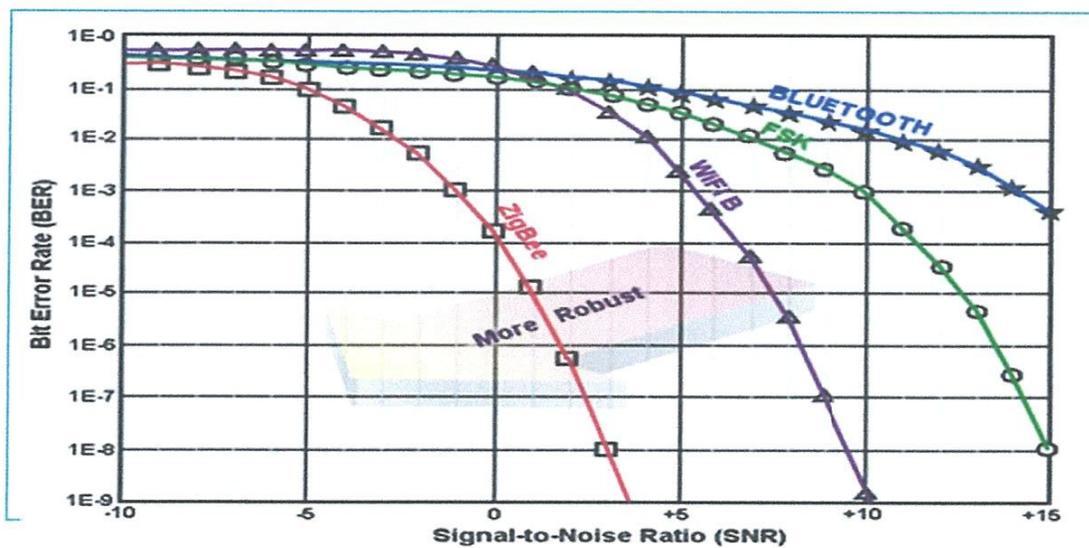


Fig. II.5. Rapport entre BER et SNR pour diverses technologies de transmission sans fil (source IEEE)

II.4.2.4 Format des trames Zigbee de niveau physique [5] :

Comme dans n'importe quel réseau, les données sont transmises en trames ("paquets"). La structure des trames Zigbee a été conçue afin de limiter au maximum la complexité et pour les rendre suffisamment robustes pour une transmission en environnement fortement bruité. La norme prévoit un paquet de niveau physique représenté sur la figure II.6. Ce paquet comprend un en-tête de synchronisation, un en-tête PHY et les données PHY.

L'en-tête de synchronisation comprend 6 octets : un préambule d'une longueur de 5 octets qui permet au récepteur de parfaire sa synchronisation et un fanion de START sur 1 octet. Ce fanion rompt l'alternance des bits transmis lors du préambule, indiquant ainsi l'imminence de la transmission de données. Après l'en-tête de synchronisation vient l'en-tête PHY dont le rôle est de spécifier la longueur du paquet. Les données suivent cet en-tête, 127 octets maximum par paquet, soit une durée de transmission maximum de 4,256 ms par paquet sur la couche PHY2450 (250 Kbits/s).

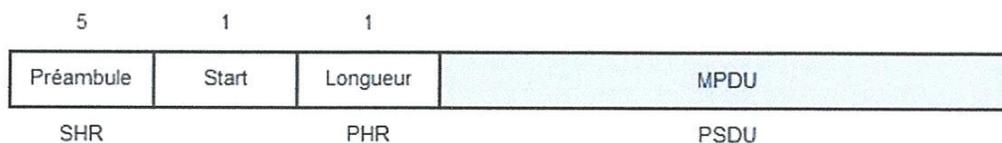


Figure II.6. Structure du paquet de niveau physique

II.4.3 La sous-couche MAC

La sous couche (MAC) assure l'interface entre la couche PHY et la couche réseau. Elle permet de résoudre notamment les problèmes d'accès concurrents au médium. La sous-couche MAC supporte deux modes d'accès qui peuvent être sélectionnés par le coordinateur de PAN: le mode non coordonné (CSMA/CA, sans RTS/CTS) et le mode coordonné disponible uniquement dans une topologie étoile où le coordinateur de cette étoile envoie des trames balises (beacon) pour synchroniser les nœuds du réseau.

- Le mode non coordonné, CSMA/CA

Dans le mode non coordonné l'accès au médium est commandé par le protocole CSMA/CA non « slotté », c'est-à-dire que le début d'une émission se fait dès que le

médium est jugé libre, sans attendre le début d'un éventuel slot. Cependant, même si l'algorithme est dit « non slotté », il se base tout de même sur une unité temporelle discrète appelée *backoff* pour retarder plus ou moins l'émission d'une trame et d'éviter les collisions. Dans ce mode, il n'y a pas d'émission de beacon donc pas de synchronisation entre les nœuds du réseau.

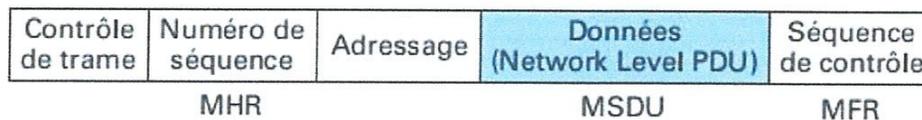


Figure II.7. Trame MAC générique IEEE 802.15.4

- Le mode coordonné, ou balisé

En mode coordonné, le coordonnateur du PAN envoie périodiquement une balise pour synchroniser l'activité des entités qui lui sont attachées selon une structure de supertrame donnée sur la figure II.8. Ce mode de fonctionnement permet les meilleures performances sur le plan énergétique car une fois l'information transmise au relais, le nœud transmetteur peut somnoler, de plus les messages en attente étant stockés dans la mémoire du relais, un nœud peut choisir de se réveiller selon ses besoins et demander alors les données en attente.

II.4.3.1 Structure d'une SuperFrame [1]

La supertrame est l'espace temporel entre deux trames balises. La supertrame comprend une portion active (les nœuds peuvent émettre et recevoir) et une portion inactive (les nœuds sont en somnolence). La portion active est divisée en 16 slots temporels de durées égales; le beacon occupe toujours le slot 0 et permet la synchronisation de tous les nœuds à portée radio.

Typiquement, les nœuds du réseau se réveillent juste avant le slot 0 et se mettent à l'écoute. A la réception du beacon, ils prennent connaissance de la structure de la supertrame qui débute et des éventuelles données en attente. Si ils n'ont ni de données à émettre, ni à recevoir, ils peuvent somnoler jusqu'au beacon suivant; sinon, ils se mettent en veille dès que la transaction (émission et/ou réception) est finalisée.

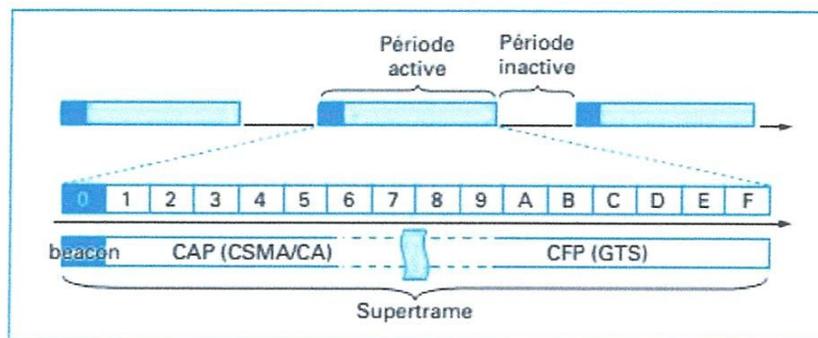


Figure II.8. Représentation d'une supertrame IEEE 802.15.4 (source [1])

La supertrame possède deux paramètres fondamentaux :

- BO (*Beacon Order*), qui fixe l'intervalle de temps entre l'envoi de deux messages beacon par le coordinateur ;
- SO (*Superframe Order*), qui fixe la durée active de la supertrame.

L'organisation de l'accès au médium par supertrame permet les meilleures économies sur le plan énergétique. Les nœuds du réseau se réveillent juste avant le slot 0 et se mettent à l'écoute. À la réception du *beacon*, ils prennent connaissance de la structure de la supertrame qui débute : valeurs de BO et SO, présence de données en attente, etc. Si les nœuds n'ont de données ni à émettre, ni à recevoir, ils peuvent somnoler jusqu'au *beacon* suivant.

Notons que plus BO et SO sont faibles, plus la fréquence des supertrames est élevée, donc plus le réseau est réactif (latence faible). En revanche, plus la différence entre BO et SO est grande, meilleures sont les économies sur le plan énergétique.

Le mode coordonné de 802.15.4 propose deux méthodes d'accès au sein de la supertrame :

- **CAP** (*Contention Access Period*) : les accès au médium se font de façon « classique », en best-effort, selon le protocole CSMA/CA.
- **CFP** (*Contention Free Period*) : durée en nombre de tranches (slots) réservée pour garantir l'accès au canal d'un nœud terminal, le nœud coordinateur peut allouer jusqu'à 7 GTS (Guaranteed Time Slot). Les accès au médium sont maîtrisés par le

coordinateur. Ce mode peut être utilisé par les nœuds qui en font la demande, et, si la capacité du réseau le permet, le coordinateur pourra allouer un ou plusieurs slots à un nœud en particulier. On parle ici de slots temporels dédiés, ou GTS, pour *Guaranteed Time Slots*. Les GTS, optionnels, occupent les derniers slots de la supertrame. On appelle cette partie de la supertrame la période d'accès sans contention ou CFP, pour *Contention Free Period*. Ce mode sans contention rend possible une réservation de bande passante et peut offrir certaines garanties temporelles. Le début de la supertrame, via la CAP, reste toujours en accès libre par CSMA/CA pour permettre l'accès aux transports ne nécessitant pas ou peu de garantie.

II.4.3.2 Structures de trames

802.15.4 propose 4 types de trames [4] :

- données (**data**),
- acquittement (**ack**), garantie la réception sans erreur,
- balise (**beacon**), gestion de l'état des nœuds par optimisation de la consommation,
- service (**MAC command**), contrôle et configuration à distance des nœuds par le nœud coordinateur.

Ces quatre types de trames ont une structure commune : un champ contrôle de trame (frame control), un champ numéro de séquence (sequence number), un ou plusieurs champs propres au type de la trame puis une séquence de contrôle sur 16 bits FCS (Frame Check Sequence).

II.4.4 La couche Réseau

Comme mentionné au début de ce chapitre, ZigBee recommande l'utilisation de la technologie proposée par le standard IEEE 802.15.4 pour les deux premières couches du modèle OSI (couche physique et couche liaison). Pour les couches supérieures, la ZigBee Alliance propose sa propre spécification, et notamment, sa propre couche Réseau (niveau 3 OSI). Bien que notre travail porte essentiellement sur les réseaux ZigBee, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de la couche 3.

II.4.4.1 Création d'un réseau ZigBee

Trois types d'appareils doivent être considérés lors de la création d'un réseau ZigBee :

1- Coordinateur ZigBee, ou *ZigBee coordinator* ZC:

Forme la racine du réseau ZigBee et peut servir de pont entre plusieurs réseaux. Chaque réseau peut avoir un seul coordinateur. Il peut enregistrer les informations sur son réseau et agir comme dépôt pour les clés de sécurité. Il agit comme simple routeur, une fois le réseau créé.

2- Routeur ZigBee, ou *ZigBee router*, ZR :

Appareils agissant en tant que routeurs intermédiaires et qui transmettent les données de et vers d'autres appareils. Il reprend les tâches du coordinateur 802.15.4.

- il doit d'abord s'associer avec le ZC ou un autre ZR,
- il accepte que d'autres éléments du réseau s'associent à lui,
- il relaie les messages selon un protocole de routage qui sera présenté plus bas,
- il est optionnel.

3- Appareil terminal ZigBee, ou *ZigBee End Device*, ZED :

C'est un appareil exécutant uniquement les fonctions de bases, en dialoguant avec le coordinateur et le routeur, mais qui ne peut pas transmettre les données venant d'autres appareils.

- Il ne constitue qu'un élément final du réseau : il n'accepte ni association, ni participation au routage des messages,
- Il est lui aussi optionnel.

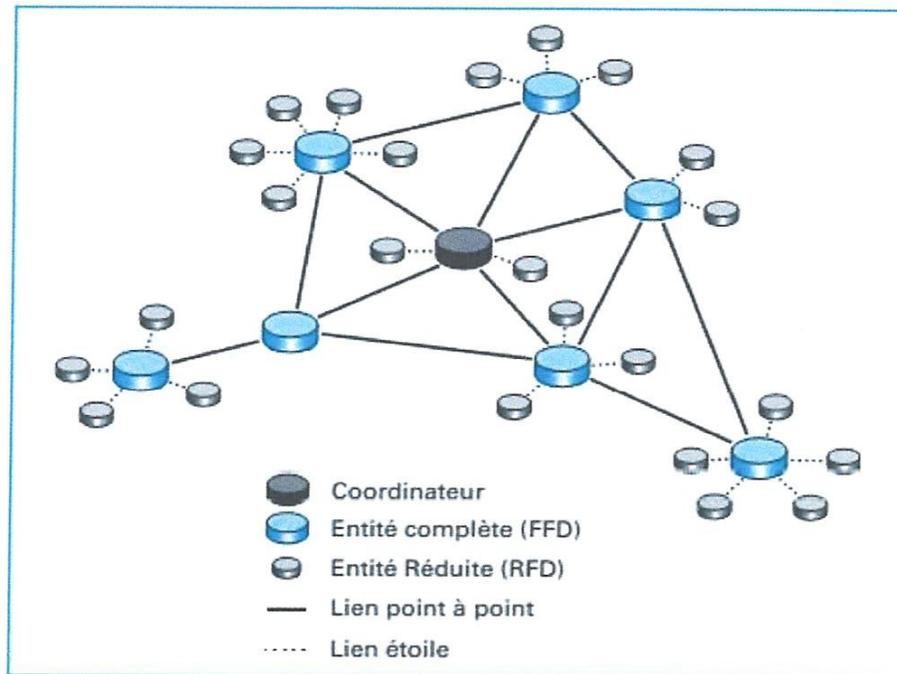


Figure II.9. Exemple d'un réseau maillé zigbee (source [1])

Un réseau crée de cette manière permet :

- La communication bidirectionnelle entre les appareils.
- L'augmentation des distances de communication entre deux ponts.
- La transmission de l'information même lorsqu'un appareil est défectueux ou temporairement hors service.

II.4.4.2 Topologie en arbre

Dans les réseaux en arbre, les routeurs transmettent les données et contrôlent les messages en utilisant une stratégie de routage hiérarchique, ils utilisent de plus une communication de type Beacons décrite dans les spécifications de l'IEEE 802.15.4. Ce type de topologie permet des réseaux très étendus 255 clusters comprenant chacun 254 nœuds soit : 64770 nœuds !

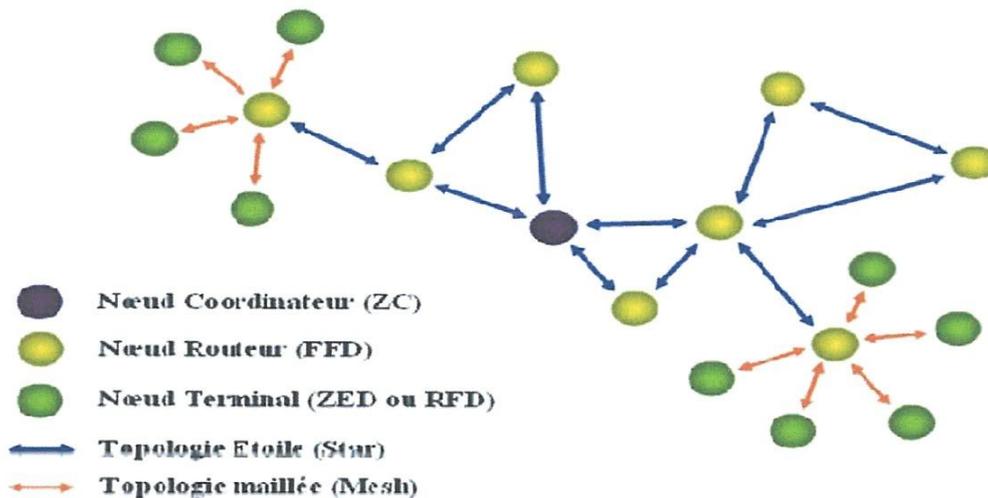


Figure II.10. Réseau zigbee en arbre

Dans les topologies maillées et en arbres, le "coordinateur zigbee" a en charge de démarrer le réseau et d'en choisir certains paramètres clés, ce réseau pouvant être étendu à l'aide de routeurs Zigbee (FFD). Les réseaux maillés permettent une communication totale de pairs à pairs (peer to peer).

II.4.4.3 Architecture de la couche réseau

La couche réseau proposée par ZigBee se décompose en deux entités [5] :

- ❖ Une première entité (NLDE, Network Layer Data Entity) traitant l'envoi, la réception des données et éventuellement la réémission de données reçues dans le cadre du routage,
- ❖ et une seconde entité (NLME, Network Layer Management Entity) chargée de la gestion et de la maintenance du réseau (routage, adressage).

L'entité NLDE communique avec la couche 2 via le point d'accès MCPS-SAP (MAC Common Part Sublayer-Service Access Point) et met à disposition des couches supérieures son propre point d'accès NLDE-SAP (Network Layer Data Entity-Service Access Point). L'entité NLME communique avec la couche 2 via le point d'accès MLME-SAP (Network Layer

Management Entity-Service Access Point) et permet au ZDO (ZigBee Device Object) de pouvoir communiquer avec elle via son point d'accès : NLME-SAP.

La couche réseau contient également une base d'information appelée NIB (Network-layer Information Base). Elle contient les informations sur les nœuds voisins et la table de routage. La structure de la couche réseau proposée par ZigBee est représentée sur la figure II.11.

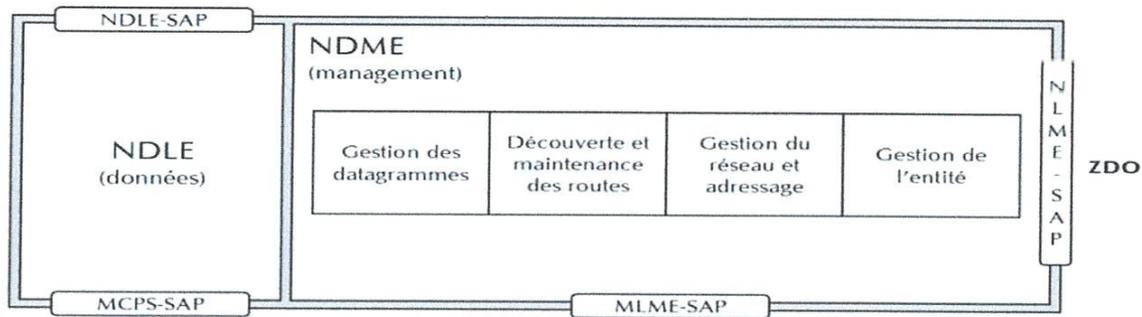


Figure. II.11. Structure de la couche réseau proposée par ZigBee

La couche NWK est responsable de la topologie maillée permettant à un nœud de communiquer à un autre grâce à un routage automatique. Tous les réseaux ZigBee sont sécurisés à la couche NWK et les données transmises sont encryptées. Les principales fonctions remplies par cette couche sont les suivantes :

- Mécanismes pour joindre, quitter et former un nouveau réseau.
- Configuration et adressage des nouveaux nœuds.
- Application de la couche sécurité aux trames et routages de celles-ci.
- La responsabilité de la topologie (construction et maintenance).
- gestion des types de services applicatifs.

II.4.4.4 Adressage [6]

L'attribution d'adresses dans ZigBee se fait de deux manières selon la valeur de la variable booléenne *nwkUseTreeAddrAlloc*. Dans le cas où elle contient la valeur "False", les adresses sont allouées d'une manière incrémentale par la couche application jusqu'à l'épuisement des adresses. Dans l'autre cas, l'adressage suit une structure d'arbre et est fait

de façon à allouer équitablement à chaque parent potentiel une partie des adresses qu'il peut distribuer à ces fils. Le coordinateur ZigBee détermine lors de la formation du réseau le nombre maximal de fils par parent ainsi que le nombre maximal de routeurs parmi ces fils. De plus, à chaque nœud, est associée une valeur appelée "depth" (profondeur) qui est le nombre minimal de sauts pour atteindre le coordinateur ZigBee. Ainsi, en considérant le nombre maximal de fils qu'un parent peut avoir (C_m), la profondeur maximale du réseau (L_m) et le nombre maximal de routeurs parmi ces fils (R_m), on calcule la fonction $C_{skip}(d)$ (équation 1.1) qui représente la taille du sous-bloc d'adresses pouvant être allouées à un parent se trouvant à la profondeur d .

$$C_{skip}(d) = \begin{cases} 1 + C_m \cdot (L_m - d - 1) & \text{si } R_m = 1 \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m} & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Équation 1.1 (source [4])}$$

La distribution des adresses dans la structure d'arbre se fait comme suit (voir figure II.12) :

- Le coordinateur ZigBee possède l'adresse 0.
- Si le nœud est un routeur ZigBee (ZR) alors :
 - S'il est le premier servi : Adresse = $A_{parent} + 1$.
 - Sinon : Adresse = $A_{attribuée\ auparavant} + C_{skip}(d)$.
- Si le nœud est un simple périphérique (ZED) : L'adresse d'un nœud n , se trouvant à la profondeur $d + 1$ serait

$$A_n = A_{parent} + C_{skip}(d) * R_m + n \quad (1.2)$$

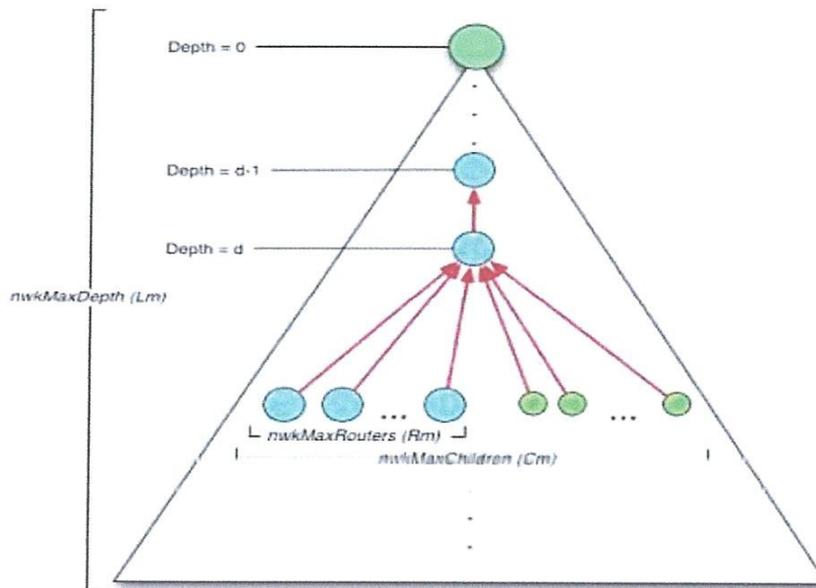


Figure. II.12 : Distribution d'adresses dans la structure d'arbre. (source [5])

II.4.4.5 Principe de routage dans les réseaux zigbee

Dans cette section, nous présentons les protocoles de routage les plus utilisés dans les réseaux ZigBee.

La règle par défaut pour router une trame dans ZigBee est la suivante : si le nœud dispose d'une table de routage et il existe une entrée dans la table alors l'utiliser. Sinon, s'il n'existe pas une entrée dans la table de routage et il existe une place libre alors lancer une requête "RouteDiscovery" (découverte de route). Sinon, router le long de l'arbre en utilisant le routage hiérarchique. Dans le dernier cas, le routage hiérarchique ainsi que l'adressage selon la structure d'arbre doivent être activés.

- **AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector)**

AODV est un protocole de routage réactif. Avec ce protocole le réseau reste silencieux jusqu'à ce qu'une nouvelle connexion soit nécessaire. Le protocole AODV réduit le nombre de diffusions de messages, et cela en créant les routes lors du besoin. L'AODV est basé sur l'utilisation de deux mécanismes : la « Découverte de route » et la « Maintenance de route ».

A cause de la mobilité des nœuds dans les réseaux ad hoc, les routes changent fréquemment ce qui fait que les routes maintenues par certains nœuds, deviennent invalides. Pour cela, l'AODV utilise les principes des numéros de séquence afin de maintenir la consistance des informations de routage et permettre d'utiliser les routes les plus nouvelles.

▪ Algorithme de routage hiérarchique

Le cas particulier de la topologie en arbre permet de simplifier grandement le routage puisque, dans le cadre de cette topologie hiérarchique, l'adressage est fonction de la topologie. Il suffit donc d'observer l'adresse du nœud de destination pour déterminer à quel voisin envoyer le paquet.

L'adresse du routeur voisin est déterminée ainsi : soit A l'adresse du routeur zigbee ayant comme profondeur d , et D l'adresse de destination.

- si l'inégalité $A < D < A + C_{skip}(d - 1)$ est fausse, alors la destination est située « plus haut », c'est-à-dire vers la racine de l'arbre, donc vers le coordinateur ZigBee ; il faut donc router le paquet en le transmettant à son nœud « père ».
- sinon, la destination est située « plus bas », c'est-à-dire dans sa propre « progéniture ». Deux cas peuvent alors se présenter :
 - ❖ si ZR n'a qu'un seul « fils », il route le paquet en l'envoyant à ce dernier.
 - ❖ si le ZR a plusieurs « fils », il route le paquet en l'envoyant au « fils » d'adresse $A + 1 + \frac{D - (A + 1)}{C_{skip}(d)} C_{skip}(d)$.

Le problème principal de cet algorithme de routage est que, de part sa structure arborescente, il ne permet pas la redondance des liens comme dans un réseau mesh.

II.4.4.6 Ordonnancement des beacons dans un réseau avec arborescence

Dans le cadre d'une topologie multi-sauts, il est nécessaire d'ordonnancer l'émission des trames beacons afin d'éviter que celles-ci n'entrent en collision avec d'autres trames

beacons. Dans sa spécification, ZigBee propose un mécanisme d'évitement de collisions de beacons en répartissant les portions actives des supertrames dans le temps pour des ZR se trouvant dans le même voisinage.

Pour ce faire, les paramètres BO (Beacon Order) et SO (Superframe Order) doivent être différents et, si possible, BO doit être le plus grand possible devant SO.

Le temps est alors découpé en portions de durée $\frac{2^{BO}}{2^{SO}}$ et chaque ZR du voisinage doit placer la portion active de sa supertrame (qui commence par un beacon) dans l'une de ces portions. Le délai qui affecte l'émission des beacons est indiqué dans le beacon émis. La connaissance de cette information permet d'une part de déterminer le moment où sa propre entité « père » reçoit le beacon de son entité supérieure, mais aussi le moment où chaque nœud du voisinage reçoit le beacon de son parent. En ayant connaissance de toutes ces informations et aussi de la valeur de SO, chaque nœud du réseau peut éviter de provoquer des collisions de beacons, mais aussi plus généralement des « collisions de portions actives de supertrames ».

Notons cependant qu'un nœud doit nécessairement être actif dans la portion active de son « père » (écoute des beacons, transfert de données indirect).

II.4.5 La couche Application

La couche application Zigbee est constituée des couches Application Support Sublayer (APS), Zigbee Device Object (ZDO) et de l'Application Framework définie par les fabricants.

La couche APS a pour responsabilité de maintenir les tables de routage entre les systèmes se rendant les mêmes services et de faire suivre les messages entre les nœuds mais aussi de déterminer quels sont les autres objets qui fonctionnent dans le même espace.

La sous-couche ZigBee Device Object (ZDO), est responsable de la gestion du réseau en local et via le médium d'accès. Il offre des services pour la découverte d'autres nœuds et services dans le réseau, et est définit l'état courant et le rôle de l'objet dans le réseau [5].

La partie Application Framework contient la ZigBee Cluster Library et fournit un framework dans lequel chaque application tourne. Les clusters sont des collections de commandes et attributs pour un certain comportement

II.5 Sécurité ZigBee

Les services de sécurité mis en place pour ZigBee se chargent de l'établissement et du transport des clés, de la protection des frames (paquets) et du management des équipements.

Le protocole ZigBee protège les messages transmis de nœud à nœud (Point To Point) en utilisant la sous-couche sécurité comprise dans la couche Liaison du modèle OSI. L'algorithme de chiffrement AES-10 (*Advanced Encryption Standard-10*) est utilisé pour préserver la confidentialité, l'intégrité et l'authenticité des trames. La sécurité au niveau du routage s'opère sur la couche Réseau. Un échange de clés est opéré pour sécuriser les échanges entre une source et un destinataire. L'initialisation des clés doit se faire à travers un canal sécurisé, au risque de compromettre toute la sécurité. Cependant, pour des questions de coût en terme de consommation, le protocole ZigBee ne prend pas en considération les notions de règles de filtrage via un pare-feu. Les politiques d'accès (ACL¹) doivent donc être établies tout en sachant que la couche qui crée la trame est responsable de sa propre sécurité. Tous les échanges sont donc chiffrés, excepté l'échange des clés.

Les clés de 128 bits peuvent être associées au réseau lui-même ou à un lien du réseau. La génération des clés est basée sur une clé lien (link key) et une clé maître (Key master) qui contrôle la correspondance entre la clé et le lien réseau. Cette clé maître doit être obtenue à travers un média sécurisé (pré-installation ou couche transport). Ces deux clés (clé maître et clé lien) ne sont visibles que sur la couche application. Idéalement, la distribution des clés se fait par l'intermédiaire de la clé maître et d'un tiers de confiance, tous deux pré-chargés. Ce tiers de confiance fournit la clé lien avec une sécurité de type Point à Point et reste l'unique fournisseur de la clé pour l'équipement.

Ainsi, chaque couche prend en charge le mécanisme de sécurité (PHY, MAC, NWK et APL [APS contient des services pour l'établissement et la maintenance des relations sécurisées et ZDO s'occupe de la politique de sécurité et de la configuration pour un équipement]) La spécification est basée sur un modèle, où chaque couche de la pile de protocoles se fait mutuellement confiance. On cite donc trois types de clés.

¹ ACL (Access Control List) est une liste de contrôle d'accès permettant une gestion fine des droits d'accès aux fichiers

- La clé « maître » qui est une clé à long-terme utilisé pour la livraison des clés de cryptage.
- La clé de liaison qui assure la sécurité sur un lien spécifique entre 2 nœuds.
- La clé de réseau qui assure la sécurité dans le réseau

II.6 Conclusion

L'étude que nous venons de présenter dans ce chapitre a permis d'arriver aux conclusions suivantes : Les spécifications imposées par la couche PHY de la norme IEEE 802.15.4 étaient assez simples. Le protocole de routage hiérarchique présente des caractéristiques intéressantes vu sa simplicité et le grand potentiel d'amélioration qu'il offre. Les spécifications ZigBee offrent un niveau de sécurité complet à chaque couche.

ZigBee est une technologie modulable qui permet la construction d'un réseau via la technologie sans-fil. Contrairement à certaines normes comme le Bluetooth ou le Wifi, elle est à très faible consommation d'énergie. Elle offre un confort à l'utilisateur, en effet le fait d'utiliser un coordinateur central et un réseau maillé lui permet de tout commander via un seul appareil sans s'occuper de l'emplacement des divers équipements.

Chapitre III :

Simulations

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de simulations sous OpNet [12] pour évaluer les performances dans les réseaux zigbee. L'objectif est de faire une analyse comparative du protocole de routage hiérarchique à celui d'OADV. Le choix d'AODV pour la comparaison est dû au fait qu'il est utilisé dans ZigBee. Ainsi, cette étude comparative donnera au même temps les performances de tout le mécanisme de routage du standard ZigBee.

Le premier paragraphe présente les hypothèses adoptées. Par la suite, nous détaillons le nouvel algorithme de routage et nous donnons un exemple d'illustration. Enfin, nous présentons la conclusion.

III.2. Hypothèses [6]

Les hypothèses auxquels nous nous basons dans cette étude sont les suivantes :

- 1- On considère un réseau de capteurs ZigBee utilisant l'adressage hiérarchique. Un nœud ne peut s'associer qu'au coordinateur ou à un et un seul routeur zigbee.
- 2- On appelle délai de bout en bout, le délai qu'un paquet doit mettre pour être transmis de la source vers la destination. Ceci inclut le délai de transmission, le délai de traitement ainsi que le délai de mise en attente du paquet au niveau de chaque nœud.
- 3- Le délai de bout en bout est la métrique qu'on utilisera pour caractériser les performances d'un protocole de routage.
- 4- On notera par M-ZBR, pour Modified-ZigBee routing Protocol.

III.3 Amélioration du routage zigbee [6]

Cette section introduit les performances faites au niveau du routage zigbee. Puis ensuite, nous donnons un exemple d'illustration. On considère un nœud source S qui désire transmettre un paquet P , qui a pour destination ' D ' et qui arrive au niveau du routeur ' A ' ayant comme profondeur ' d '. on désigne par $V(x)$ la liste des voisins du nœud x et ' $d(x)$ ' la profondeur du nœud x .

III.3.1 Description de M-ZBR

Le principe de notre algorithme de routage est le suivant : Le nœud émetteur vérifie tout d'abord si la destination est l'un de ses descendants. Si oui, il l'achemine selon le routage hiérarchique de base. Si ce n'est pas le cas, il envoie une requête à ses voisins distants d'un seul saut et de même profondeur, Chaque voisin recevant le message, vérifie de même si le destinataire est l'un de ses descendants. Si oui, le voisin renvoie un accusé à l'émetteur et se charge de l'acheminement du message. Sinon, le voisin rejette le message. Au niveau du nœud émetteur, si le temporisateur expire sans rien recevoir, le message est transmis vers le père.

If D is a descendant of node A

then Use the rule given this equation to find the Next

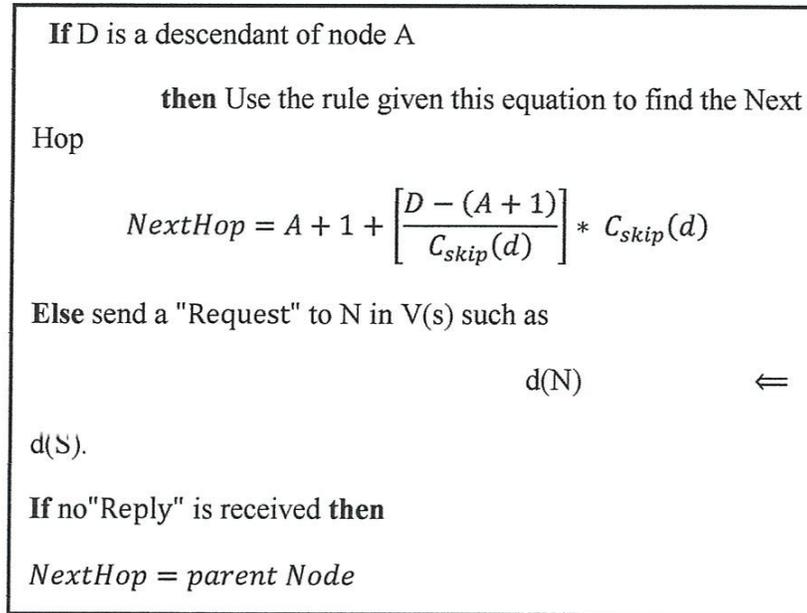
Hop

$$NextHop = A + 1 + \left[\frac{D - (A + 1)}{C_{skip}(d)} \right] * C_{skip}(d)$$

Else

NextHop = parent Node

Si nous nous restreignons au routage ZigBee dont un nœud appartenant au chemin emprunté tombe en panne, tous ses descendants ne peuvent plus acheminer leurs données vers la station de base. De plus, après avoir analysé le comportement de ce protocole, pour certains cas simulés, nous avons constaté que le paquet doit aller jusqu'au premier père commun entre l'émetteur et le destinataire pour pouvoir après descendre dans l'arbre et atteindre sa cible et cela même si les nœuds sont proches l'un de l'autre en profondeur. Ainsi, nous avons pensé à une exploration horizontale de l'arbre ce qui augmente la probabilité de trouver un chemin alternatif vers le destinataire en un minimum de sauts sans avoir obligatoirement besoin à emprunter des liens fils-père tout en gardant le profit provenant de la simplicité du routage hiérarchique. L'algorithme proposé est le suivant :



III.3.2 Exemple d'illustration

Considérons un réseau ZigBee formé de 10 routeurs ZigBee et d'un seul coordinateur. Supposons que le nœud 8 cherche à transmettre des données vers le nœud 10.

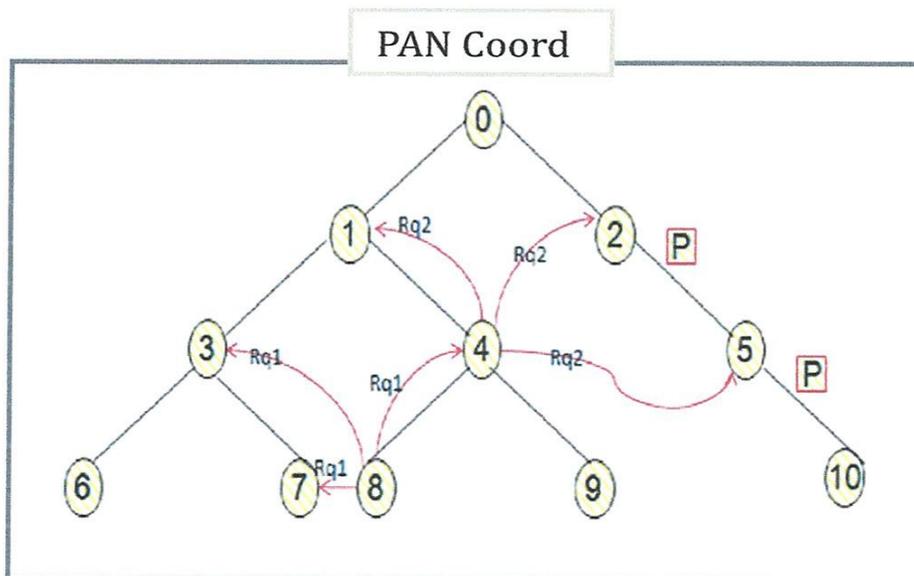


Figure III.1. Routage hiérarchique et routage hiérarchique amélioré

Au niveau du nœud 8, nous appliquons l'algorithme modifié : 10 n'est pas descendant de 8 alors Envoyer un Request vers $Neighbors(8) = \{4, 7, 3\}$.

10 n'est pas descendant de 3 et 3 n'est pas père de 8 alors Rejeter le Request. 10
n'est pas descendant de 7 et 7 n'est pas père de 8 alors Rejeter le Request. 10 n'est
pas descendant de 4 et 4 est père de 8 alors Envoyer le message P de 8 vers 4, Envoyer un
Request vers Neighbors(4) = {1, 2, 5}.

10 est descendant de 2 alors Envoyer un Reply de 2 vers 4,

Envoyer le message P de 4 vers 2,

Envoyer le message P de 2 vers 10.

10 est descendant de 5 alors Envoyer un Reply de 5 vers 4,

Envoyer le message P de 4 vers 5,

Envoyer le message P de 5 vers 10.

Le message P est dupliqué. Le nœud 10 le reçoit deux fois. Ainsi, pour résoudre ce problème, le nœud 4 ne répond qu'au premier "Reply" lui arrivant avant l'expiration de son temporisateur. Les requêtes sont envoyés saut par saut pour éviter la propagation du trafic du contrôle dans des zones non concernées du réseau et donc limitations des collisions dû à l'établissement du chemin de la source vers la destination. L'inondation est dirigée et locale : ne participer à la recherche de route et au routage si aucun chemin vers la destination n'est atteignable à partir d'un nœud voisin, le prochain saut est le nœud père. Au pire des cas le chemin emprunté est celui de l'arbre.

III.4 Description et scénarios de la simulation

On considère un réseau de capteurs sans fil zigbee. Le plus grand réseau est constitué d'un seul coordinateur ZigBee (ZC) et 200 routeurs ZigBee. Puisque les nœuds simples ne participent pas au routage, on ne les considèrera pas dans la simulation. Le réseau est totalement connecté et chaque nœud n'entend que ces voisins directs. La profondeur maximale (Lm) est égale à 6, le nombre maximal de fils par parent (Cm) est égal à 7 et le nombre maximal de routeurs parmi ces fils (Rm) est égal à 6. Une dizaine de scénarios ont été simulé. Au début, il s'agissait d'étendre le réseau en augmentant la profondeur de l'arbre. Puis, nous avons étudié l'envoi des données vers le **nœud 0**. Cela a permis, tout d'abord, de discerner l'évolution du délai de bout en bout.

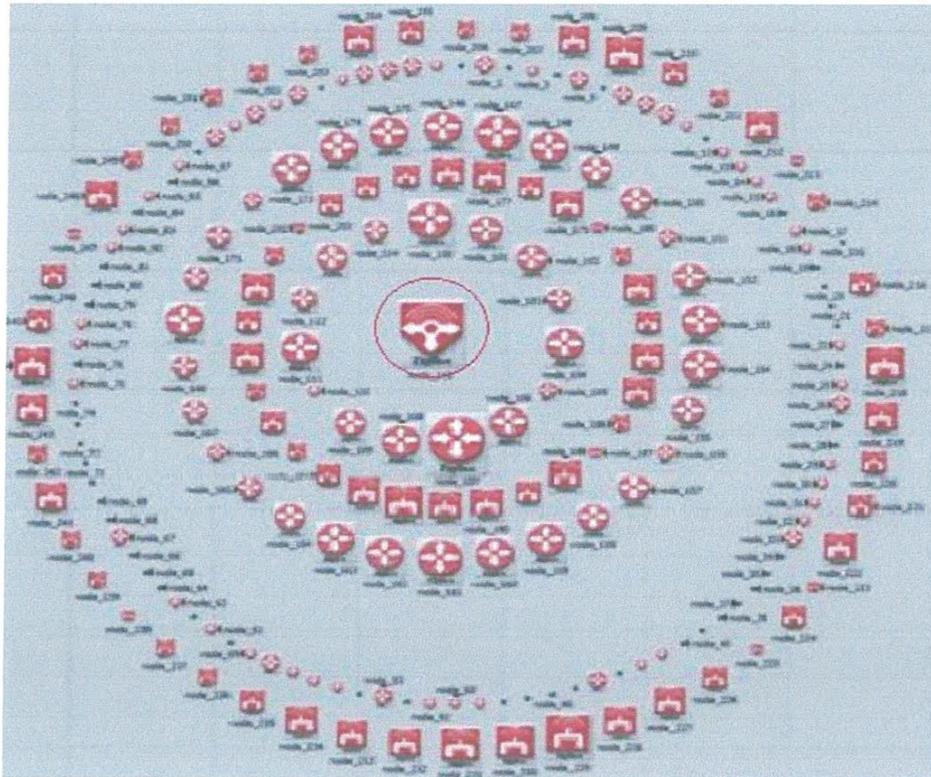


Figure III. 2. Réseau de capteurs sans fil considéré

III.4.1 Etude de délai de bout en bout

La figure III.2 montre les délais moyens de bout en bout de AODV et de routage hiérarchique en fonction de la profondeur des nœuds. Le délai moyen des nœuds dans la première profondeur (nœud égal à 1) est la même pour les deux protocoles AODV et hiérarchique. Ceci est prévisible du fait que le délai de découverte de route de AODV est très court et ne consomme presque pas du temps. Un seul RREQ (Route Request) et un seul RREP (Route Reply) sont échangés avant de transmettre les paquets de données. Pour les autres nœuds, le routage hiérarchique est performant parce que la route selon l'arbre vers le Coordinateur Zigbee est généralement la meilleure. Par contre, AODV doit découvrir la route avant d'envoyer les données.

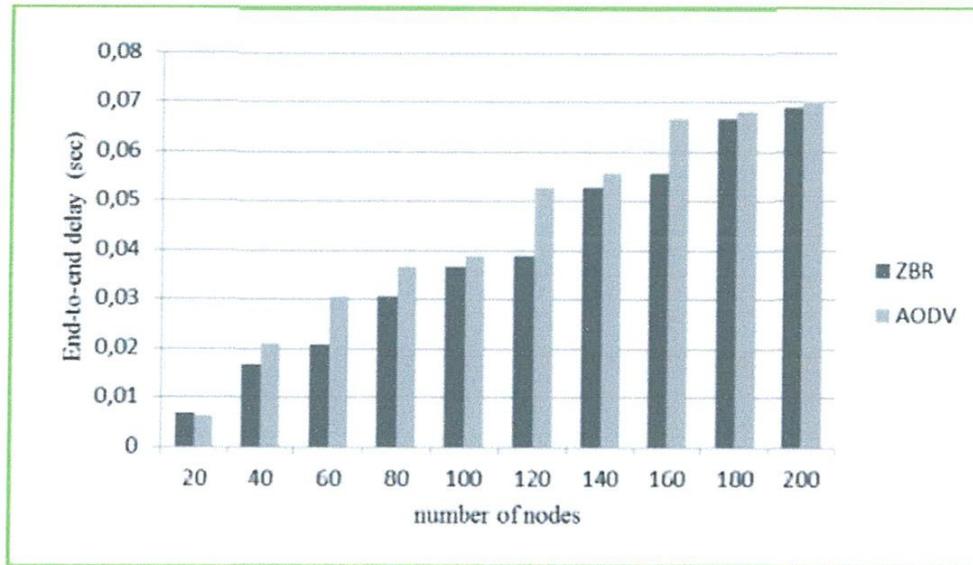


Figure III. 3. Délais de bout de bout en fonction de la profondeur

Pour une grande profondeur de l'arbre, le routage hiérarchique de base est plus performant parce que le plus court chemin vers la racine est généralement celui qui suit les liens fils-père de l'arbre. Notons aussi que les deux protocoles ne choisissent pas la même route et pire encore AODV ne choisit pas toujours le meilleur chemin. Ce ci est causé par des délais additionnels dans la transmission des messages de découverte de route.

III.4.2 Taux de paquets délivré (TPD)

Cette partie expose les performances de protocoles de routages hiérarchiques et à la demande selon la contrainte taux de paquets délivrés.

Le taux de paquets délivrés diminue mais ne s'annule que lorsque chaque chemin vers la destination contient au moins un nœud mort. Cela est dû à l'augmentation de nombre des sauts, la probabilité de collisions ainsi que le taux de perte. De plus, les chemins les plus longs sont vulnérables à la rupture des liens et nécessitent plus de coût de contrôle pour ses ré-établissements. Les résultats montrent que le routage hiérarchique de base présente de meilleurs taux de délivrance permettant ainsi une disponibilité de service indépendamment de la taille du réseau mais il ne résiste pas pour une longue durée à cause de sa nature statique.

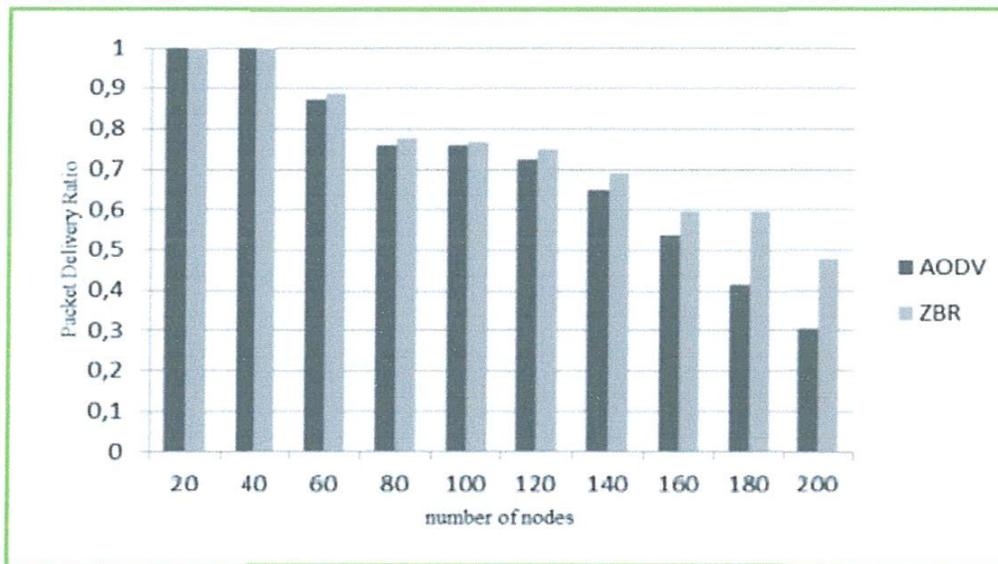


Figure III.4. Taux de paquets délivrés en fonction de la profondeur

III.4.3 Durée de vie du réseau (lifetime)

Dans les réseaux de capteurs, les nœuds ont tendance à mourir vite. Nous comparons ainsi la durée de vie d'un réseau utilisant le protocole ZBR à celui de AODV. La métrique à évaluer dans cette section est la durée de vie du réseau. Tous les nœuds sont à énergie limitée. Le trafic circule entre deux nœuds choisis aléatoirement. Pour les deux protocoles en question, nous avons suivi l'évolution du réseau jusqu'à la mort du premier nœud.

Tableau III.1 : Instant de mort du premier nœud

Protocole	ZBR	AODV
Temps de mort (sec)	84.3946	89.4024

Les résultats obtenus dans le tableau III.1 montre que la durée de vie d'un réseau utilisant le routage hiérarchique de base est plus faible que pour un réseau utilisant le routage AODV. Le chemin étant préétabli, cela permet d'échanger plus de trafic dans une période moins longue. Le facteur majeur de l'épuisement d'énergie revient à la nature statique du protocole de routage hiérarchique qui ne route qu'à travers des liens père-fils.

Ainsi, un seul chemin est emprunté par tout le trafic ce qui épuise rapidement l'énergie résiduelle de certains nœuds par rapport à d'autres vu qu'ils sont plus sollicités. Cela fait qu'après un certain temps, le routage vers la destination n'est plus possible. Tous les nœuds descendants du nœud mort deviennent isolés par rapport au reste du réseau. C'est une des faiblesses du routage hiérarchique de base.

Synthèse

Les résultats obtenus par la simulation doivent être pris comme indication pertinente sur le comportement de ces deux protocoles de routage et non comme une représentation exacte de son comportement en environnement réel, compte tenu de plusieurs contraintes de simulation à savoir la dimension du champ des nœuds, leur répartition, le nombre de nœuds, le type de trafic et le temps de simulation [9].

D'autre part nous avons comparé ces différents scénarios afin de déterminer les particularités du routage hiérarchique dans les réseaux ZigBee. Nous avons notamment constaté que le routage hiérarchique présente dans certains scénarios des défaillances. Les résultats de simulations ont montré que le routage hiérarchique de base présente de meilleurs délais et taux de délivrance permettant ainsi une disponibilité de service indépendamment de la taille du réseau mais il ne résiste pas pour une longue durée à cause de sa nature statique.

III.5. Analyse de performance du protocole M-ZBR

Dans cette section, nous présentons une étude empirique sur les performances du M-ZBR dans un réseau de communication sans fil « ZigBee ». Nous avons commencé par la simulation afin de valider notre algorithme proposé. En premier temps, nous avons commencé avec un seul coordonnateur, 6 rotors et 6 terminaux. L'ensemble de flux de données a été acheminé de terminaux au coordonnateur du réseau. Dans un deuxième temps, nous avons augmenté le nombre de nœuds à 200 et nous avons analysé les pires des cas.

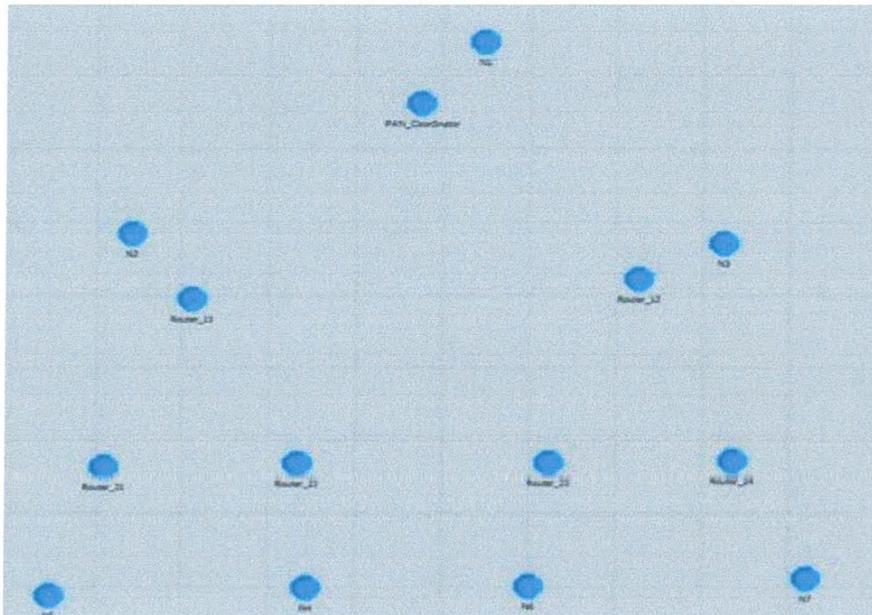


Figure III.5. Présentation du réseau.

Chaque nœud dans le réseau génère un paquet de données toutes les minutes, et il commence l'envoi des données à un moment choisi au hasard. Les paramètres importants des simulations sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau III.2. Paramètres de simulation.

technologie	ZigBee
Protocole	ZBR/ZBR-M
MAC/PHY	802.15.4
Canal	Wireless Channel
Topologie	100*100
Nombre des nœuds	7-100-200

III.4.1 Résultats de simulation

Nous avons développé le protocole de routage ZBR-M tout en gardant le même réseau et les mêmes paramètres de simulation cités dans la dernière section.

50 simulations ont été exécutées et pour chaque nœud choisi au hasard, le trafic de données est envoyé à partir de ce nœud vers le coordinateur du réseau.

Pour les différentes simulations, nous avons commencé à travailler sur un réseau de 7 nœuds jusqu'à l'atteinte d'un réseau de 200 nœuds. A la fin des simulations, on calcule la moyenne des métriques de performance à savoir le taux de paquets délivrés, le délai de bout en bout et la consommation d'énergie. Les mesures des métriques sont montrées dans les tableaux III.3 et III.4 ci-dessous :

Tableau III.3. Résultats de simulation de 7 nœuds

	ZBR	M-ZBR
Taux de paquets délivrés (%)	99,87	99,88
Délai de bout en bout (sec)	0,008	0,005
Consommation énergie (mJ)	0,449095	1,00325

Tableau III.4. Résultats de simulation de 200 nœuds

	ZBR	M-ZBR
Taux de paquets délivrés (%)	48,93	51,22
Délai de bout en bout (sec)	0,0685	0,0647
Consommation d'énergie (mJ)	1,2075665	2,1776277

Selon les résultats des simulations, nous avons prouvé que l'algorithme modifié ZBR-M est plus performant que l'algorithme basique en terme de délai de bout en bout et de taux de paquets délivrés. Cet algorithme succède à éliminer les pires des cas et de parvenir à une basse gamme pour mettre fin aux retards.

III.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations pour évaluer les performances du routage proposé par ZigBee Alliance tout en le comparant au routage à la demande AODV afin d'identifier les caractéristiques du routage hiérarchique ainsi que ses déficiences.

Cette analyse a montré que le routage hiérarchique est plus performant que celui d'AODV en terme de délai de bout en bout. Toutefois, la consommation d'énergie dans routage hiérarchique est concentrée sur certains nœuds, ce qui épuise leurs énergies rapidement. AODV en revanche, aboutit à une meilleure dissipation d'énergie.

Chapitre IV :

Test d'application

IV.1 Introduction

Pour tester et évaluer le développement de modules zigbee/IEEE 802.15.4, un test d'application a été développé. Le test consiste à concevoir et réaliser un réseau radio de deux nœuds et l'acquisition de la température à l'aide d'un kit PICDEM Z et de transmettre la valeur vers un PC par voie RF en utilisant le protocole ZigBee. Ainsi, ce chapitre comporte deux parties : le développement de la carte permettant d'assurer les fonctions de communications entre les deux nœuds, et le développement permettant l'acquisition de la température. Dans la suite, nous présenterons l'environnement de ce travail et le matériel de ce test. Et enfin, nous décrirons les résultats expérimentaux de ce test.

IV.2 Environnement du travail

Ce test s'effectue dans le cadre d'une application portant sur les modules de Microchips PICDEM Z, dans le laboratoire d'automatique et robotique du département de génie électrique. L'application est scindée en deux points principaux :

- Créer un réseau radio de deux nœuds.
- Etude d'une application permettant l'acquisition de la température.

Notons que notre objectif sera basé sur le premier test afin de pouvoir analyser les mécanismes de collisions.

IV.3 Description du matériel [10]

L'application est composée d'un PC et de La carte PICDEM Z. la carte PICDEM™ Z contient les produits suivants :

- Deux cartes mères de PICDEM™ Z
- Deux cartes filles 2.4 GHz RF
- Analyseur de réseau ZANA™ et un Câble USB.

Le tableau suivant présente les différents numéros de PICDEM Z.

Tableau IV.1 : Nombres d'éléments PICDEM Z

Description	Part Number
PICDEM™ Z Motherboard	AC163027-1
MRF24J40MA PICDEM Z 2.4 GHz RF Board	AC163028
ZENA™ Network Analyzer	DM183023



Figure IV.1. La carte PICDEM™ Z

Chaque module en a alors son propre rôle.

IV.3.1 Rôle de la carte PICDEM™ Z

Le kit de démonstration PICDEM™ Z permet à des lotisseurs d'évaluer et développer avec les solutions sans fil de microchip. Le kit fournit deux cartes mères et deux cartes filles 2,4 GHz MRF24J40MA qui peuvent être employés pour former un réseau radio simple de deux nœuds (clef partie II, expérience). D'autres nœuds ou composant peuvent être ajoutés sur le réseau.

Le schéma de la carte mère PICDEM Z est représenté ci-dessous

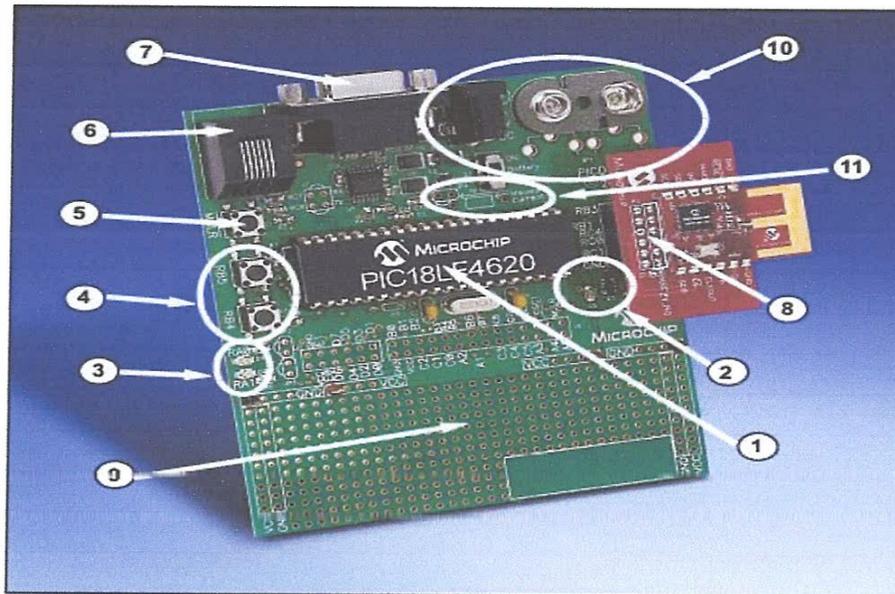


Figure IV.2. Carte mère PICDEM Z

La carte mère est actionnée par une alimentation d'énergie externe par l'intermédiaire du connecteur de puissance coaxiale de 2,5 mm (J1) ou portable par l'intermédiaire d'une batterie de 9V (B1).

Le kit contient un analyseur de réseau ZENA qui montre graphiquement le trafic de réseau sans fil après les spécifications de l'IEEE802.15.4 de la bande 2,4 GHz. Le ZENA soutient les protocoles d'IEEE802.15.4, et de MiWi. Le logiciel peut également analyser le trafic complet du réseau et montrer les paquets décodés.

La carte mère PICDEM Z comporte des nombreuses fonctionnalités pour permettre l'évaluation et le développement de solutions sans fil.

1. Microcontrôleur 28 et 40 broches DIP Sockets : les cavités autorisent l'usage de 28 et 40-pin package DIP microcontrôleurs. La prise 40 broches (U4) contient un microcontrôleur PIC18LF4620 cadencé par un cristal 4 MHz (Y1). La prise à 28 broches est inhabitée et est située sous le boîtier DIP 40 broches. Pour utiliser le connecteur à 28 broches, retirez soigneusement le microcontrôleur DIP 40 broches.
2. Capteur de température : la carte mère contient les microchips TC77 capteur thermique avec interface SPI.

Le TC77 part le bus SPI avec la carte fille sans fil branchée sur le connecteur J2.

3. LEDs : D1 et D2 sont conduits par les ports microcontrôleurs RA0 et RA1, respectivement.
4. Commutateurs de bouton : S2 et S3 sont connectés respectivement aux ports microcontrôleur RB5 et RB4. Il n'y a pas de résistances de la traction externes sur la carte mère.
Par conséquent, le pull-up interne sur trait PORTB doit être activé.
5.  Push Button Switch: connecté à la broche MCLR du microcontrôleur.
6. ICSP™ Jack : la prise 6-pin RJ-11 est utilisée pour connecter un programmeur microcontrôleur comme MPLAB ICD 2 en circuit ou MPLAB REAL ICE™ en circuit émulateur.
7. Connecteur RS-232 : permet la carte mère de se connecter à un port série du PC pour la commande interactive ou de débogage.
8. Wireless Daughter Card Connector: Le connecteur J2 est un connecteur 12 broches qui fournit une alimentation de 3,3 V, 4 fil SPI, reset, suite et les connexions d'interruption au microcontrôleur.
9. Espace prototypage. Maquette fourni aux circuits supplémentaires pour le développement.
10. Power : la carte mère est alimentée par une alimentation externe via le connecteur de 2,5 mm d'alimentation coaxial (J1) ou de façon portable par une pile de 9V (B1). Le régulateur de tension à bord (U2) est un LP2981, un micro puissance 100 mA régulateur ultra faible chute de tension dans un package SOT-23.
11. Measure Current : le jumper JP4 peut être utilisé pour mesurer par tous les circuits sur la carte mère après le régulateur de tension (U2). Pour mesurer le courant, couper le PCB de trace sur la face inférieure et insérer un ampèremètre.

		J2					
<u>Microcontroller</u>	<u>Signal</u>	<u>Pin</u>		<u>Pin</u>	<u>Signal</u>	<u>Microcontroller</u>	
RB3		12	□	11		RB2	
RB1		10	□	9	SCK	RC3	
RC4	MISO	8	□	7	MOSI	RC5	
RC0	\overline{CS}	6	□	5	INT	RB0	
RC1	WAKE	4	□	3	\overline{RESET}	RC2	
	GND	2	□	1	+3.3V		

(Top view on Motherboard)

Figure IV.3. Brochage de connecteur J2

Le protocole Microchip zigbee-2006 est certifié pour fonctionner sur les familles PIC18 et PIC24 de microcontrôleurs microchip PIC et le transceiver MRF24J40 2,4 GHz RF.

- **Protocole Microchip MiWi™**

Le protocole MiWi est un protocole simple, conçu pour les données à faible débit, courte distance, des réseaux à faible coût. Le protocole MiWi fournit une alternative facile à utiliser. Il vise en particulier les petites applications.

- **Protocole Microchip MiWi P2P.**

Le protocole MiWi peer-to-peer (P2P) est une couche application au dessus de la couche PHY et MAC qui support les topologies point à point et étoile. Il n'a pas de mécanisme de routage, de sorte que la couverture des communications sans fils est définie par la portée radio.

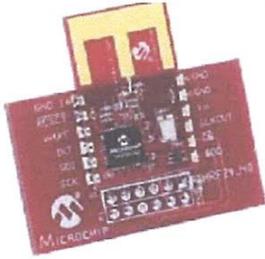
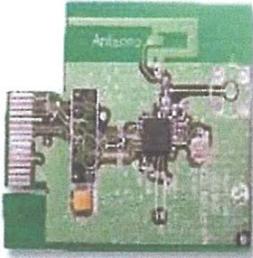
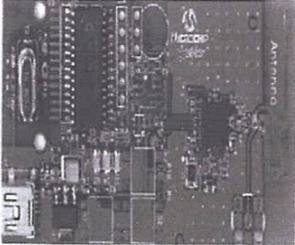
Produits	MRF 24J40MA 2,4 GHz (carte RF)	Carte PICDEM Z 2.4 GHz (carte RF)	Analyseur du réseau ZENA
Images			
Constructeur	Microchip	Microchip	Microchip

Figure IV.5. Tableau représentant les modules

IV.4 Résultats de l'expérience

IV.4.1 Association des nœuds et mécanismes de scan du canal

Cette section présente les expérimentations que nous avons faites pour analyser les mécanismes d'associations entre les deux nœuds. Pour visualiser le trafic de communication, nous utilisons l'analyseur de réseau ZENA. ZENA peut montrer comment les messages se propagent à travers le réseau. Il peut également fournir un aperçu des obstacles physiques qui affectent le système.



Figure IV.6. fenêtre principale de l'analyseur ZENA.

Comme nous l'avons expliqué dans les précédant chapitres, le coordinateur forme le centre du système. Pour comprendre ce phénomène, nous avons conçu une réelle expérimentation en utilisant les modules microchips PICDEM Z (figure IV.7).



Figure IV.7. Sniffer Microchip, PICDEM Z

L'architecture du réseau est présentée dans la figure ci-dessous.

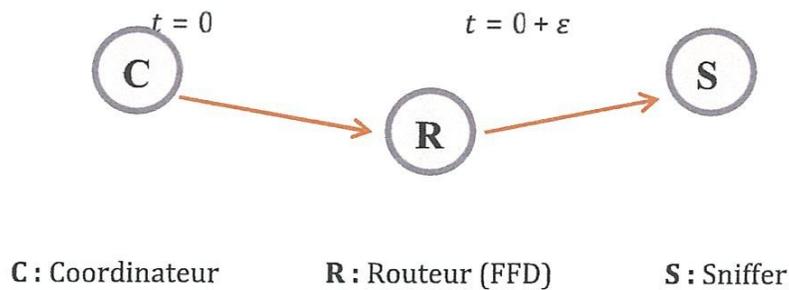


Figure IV.8. Architecture du test de réseau

La procédure de l'association a lieu quand un appareil veut s'associer avec un Coordinateur. Ce mécanisme peut être divisé en trois phases différentes:

- (1) procédure de scan de canal;
- (2) sélection d'un parent possible;
- (3) association avec le parent.

L'IEEE 802.15.4 permet quatre types de procédures de scan du canal: (1) le scan détection d'énergie, où l'appareil obtient une mesure de l'énergie maximum dans chaque canal; (2) le scan actif où l'appareil localise tous les Coordinateurs qui transmettent le trames balises; (3) le scan passif, similaire au scan actif, l'appareil localise tout Coordinateur qui transmet des trames balises avec la différence que le scan est exécuté seulement en mode réception, sans transmettre des demandes de balise; et (4) le scan orphelin, utilisé pour localiser le Coordinateur avec lequel l'appareil de l'analyse avait précédemment associé.

Après que la procédure du scan du canal soit complétée, la couche NWK reçoit une liste de tous les registres du PAN détectés (contenir de l'information).

Ainsi, pour qu'un nœud s'associe au réseau il doit d'abord passer par la phase de Scan dans le but de récupérer les informations sur son environnement véhiculées dans les Beacons envoyés par le coordinateur. Si le Coordinateur accepte le dispositif, il l'ajoute à sa table de voisin comme son fils. Ces mécanismes sont décrits ci-dessous.

La figure IV.9 montre un exemple de séquence de messages une 'association request' réussie suivie d'une transmission de données. Lorsque le routeur reçoit la trame du coordinateur de PAN, il répond immédiatement.

Le mécanisme de scan du canal permet surtout d'éviter d'éventuelles collisions. Le but est de récupérer les informations sur son environnement véhiculées dans les Beacons envoyés par le coordinateur.

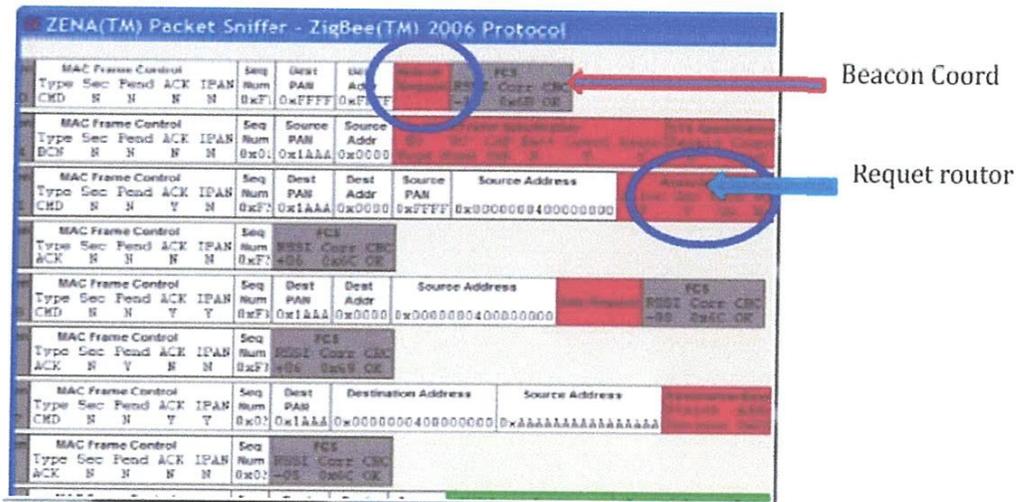


Figure IV.9. Exemple d'une capture reçue par le microchip

On peut ainsi mesurer le temps de décalage entre l'émission et la réception de la trame.

Après récupération de ces informations le nœud devra décider du coordinateur à rejoindre, puis passer à la phase d'association proprement dite qui consiste à l'échange entre le nœud et le coordinateur sélectionné de requêtes de type requête d'association (Association Request) et réponse d'association (Association Response). La figure IV.10 est un exemple clés de mécanismes d'association des deux nœuds.

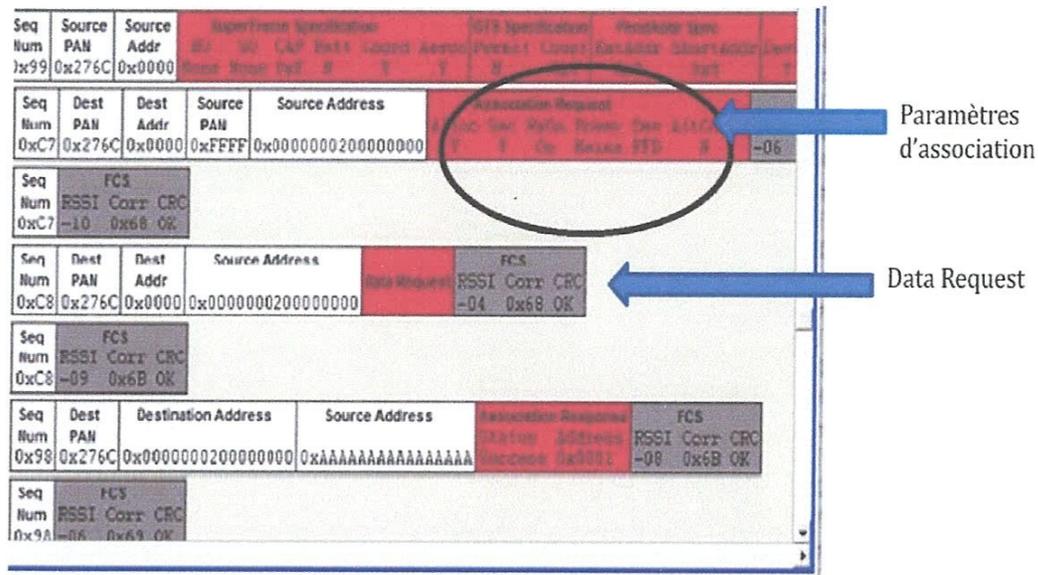


Figure IV.10. Mécanisme d'association

Lorsque le coordinateur reçoit la requête d'association il doit d'abord acquitter la bonne réception de cette dernière. Le coordinateur notifie son acceptation de l'association du nœud au PAN en générant une adresse courte puis la renvoie dans la requête « Association Response » (figure IV.11).

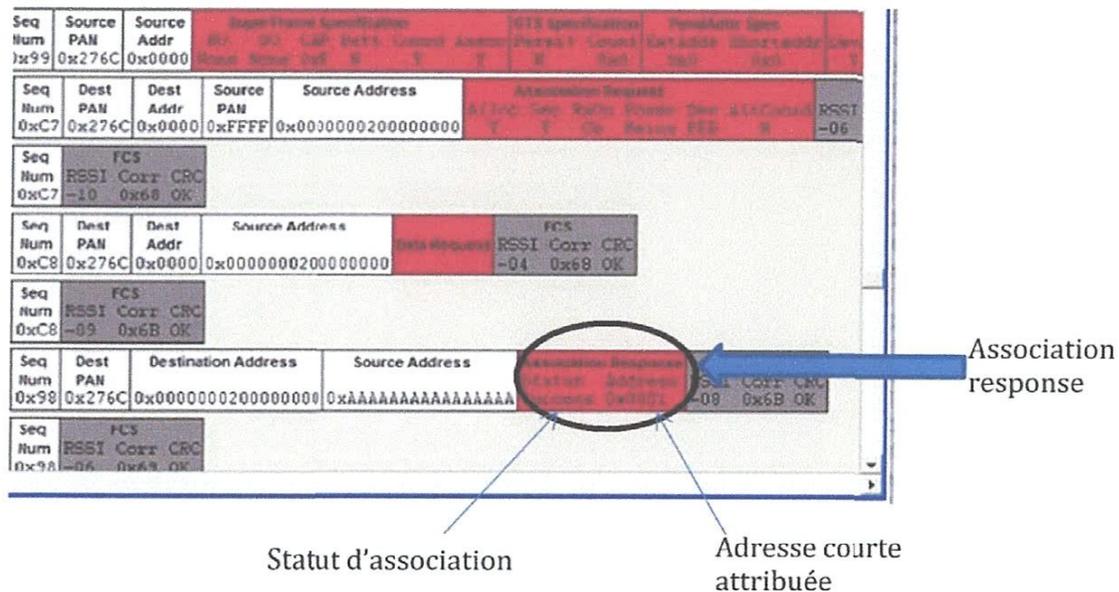


Figure IV.11. Mécanisme de réponse d'association

Le nœud doit attendre la réponse du coordinateur après l'envoi de sa requête, et ce processus d'association peut de ce fait être étalé sur plusieurs supertrames. Le processus

d'association est terminé uniquement lorsque le nœud reçoit l'Association Response en réponse à sa demande explicite en utilisant la requête Data Request.

Notons que si au terme de ce délai d'attente aucune réponse n'a été reçue le nœud pourra faire une nouvelle tentative. Dans le cas où le coordinateur ne peut accepter l'association du nœud, il devra quand même envoyer une Association Response indiquant l'impossibilité de l'association. L'Association Request ne peut être envoyée qu'en mode indirect.

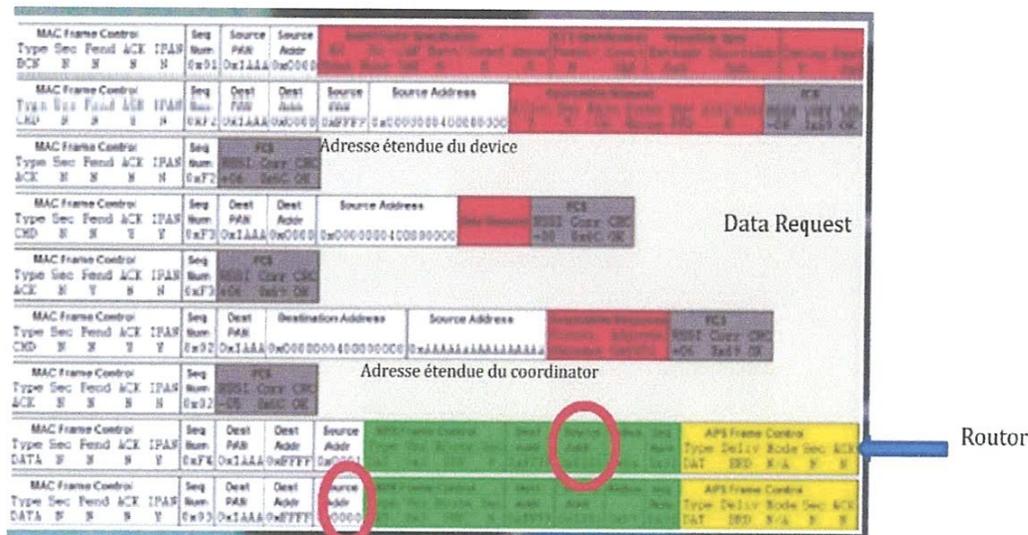


Figure IV.12. Association Request et Réponse

Le routeur a maintenant réussi à rejoindre le réseau.

N.B : La requête Dis-association Request est utilisée dans le cas où un nœud veut quitter le réseau ou qu'un coordinateur veut se séparer d'un de ses fils.

Le coordinateur diffuse les messages avec "0xffff" comme adresse de destination; "0x0000" comme Adresse source, et une balise qui marque les messages en tant que groupe a adressé des messages de diffusion. L'adresse du routeur est 0x0001. Le routeur rediffusera les messages, mais ne répond pas au coordinateur, car il n'est pas encore un membre du groupe 0x0004 pour partager un lien commun.

Lorsque le routeur s'ajoute lui-même en tant que membre du Groupe de 0x0004. Il n'ya aucun trafic associé au Sniffer puisqu'il s'agit d'une opération interne et rien n'est transmis sur les ondes. Tous les nœuds font maintenant partie du groupe 0x0004.

Le coordinateur envoie ensuite un group broadcast à tous les dispositifs faisant partie du groupe 0x0004. On peut voir que le message envoyé à partir du coordinateur a été bien reçu par la deuxième carte ainsi affiché sur le Sniffer.

Le message est émis à l'adresse "0xFFFF" Adresse de destination au groupe 0x0004.

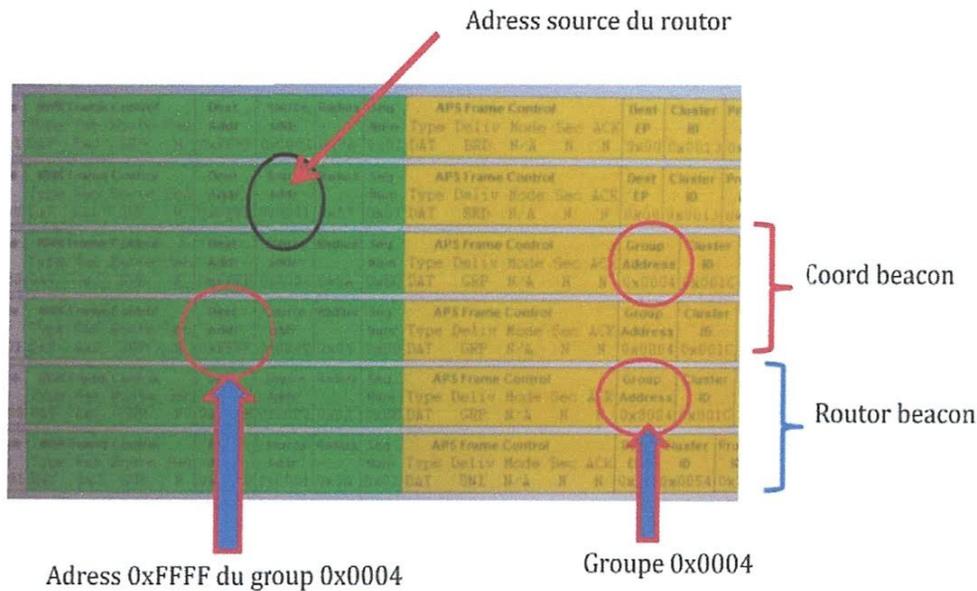


Figure IV.13. Fin du processus d'association des nœuds.

Lorsque le routeur demandeur reçoit ces messages, il sait maintenant qu'il partage une communication bidirectionnelle avec son voisin.

IV.4.2. L'acquisition de la température.

Ce test n'a pas pu se faire pour des raisons évoquées dans le paragraphe « problèmes rencontrés » plus loin dans cette section. Toutefois, nous décrivons le développement de ce test pour permettre de comprendre les fonctionnements. Ce test réalisé avec l'aide de OUDINI étudiant en master II électronique.

IV.4.2.1 Réalisation de la carte

Le TC77 n'exige pas de composants supplémentaires pour mesurer la température. Cependant, il est recommandé qu'un condensateur du découplage de 0.1 µF à 1 µF soit

fourni entre le VCC (V_{DD}) et GND (V_{SS}). Ceci pour assurer une protection du bruit efficace au TC77.

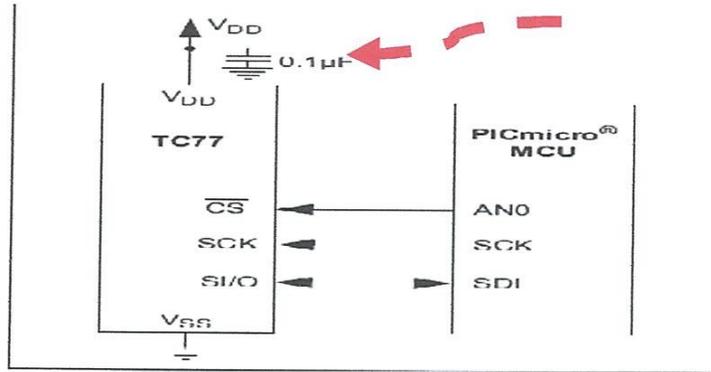


Figure IV.14. Schéma du montage de la carte

Le TC77 doit pouvoir mesurer la température en dirigeant le voltage d'une diode localisée sur le die du circuit imprimé (IC). Le schéma ci-dessous illustre le block diagramme.

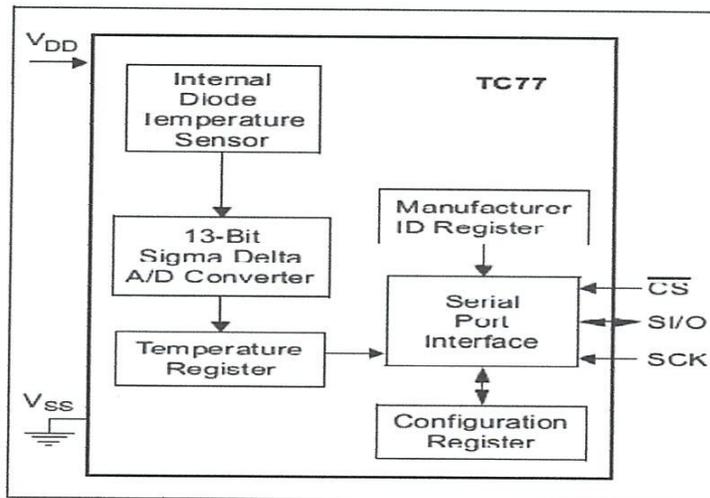


Figure IV.15. Schéma block du diagramme

Le système conçu doit permettre l'envoi périodique de la température vers le PC via la liaison ZigBee avec une période d'environ une ou deux seconde. Le diagramme suivant illustre ce fonctionnement :

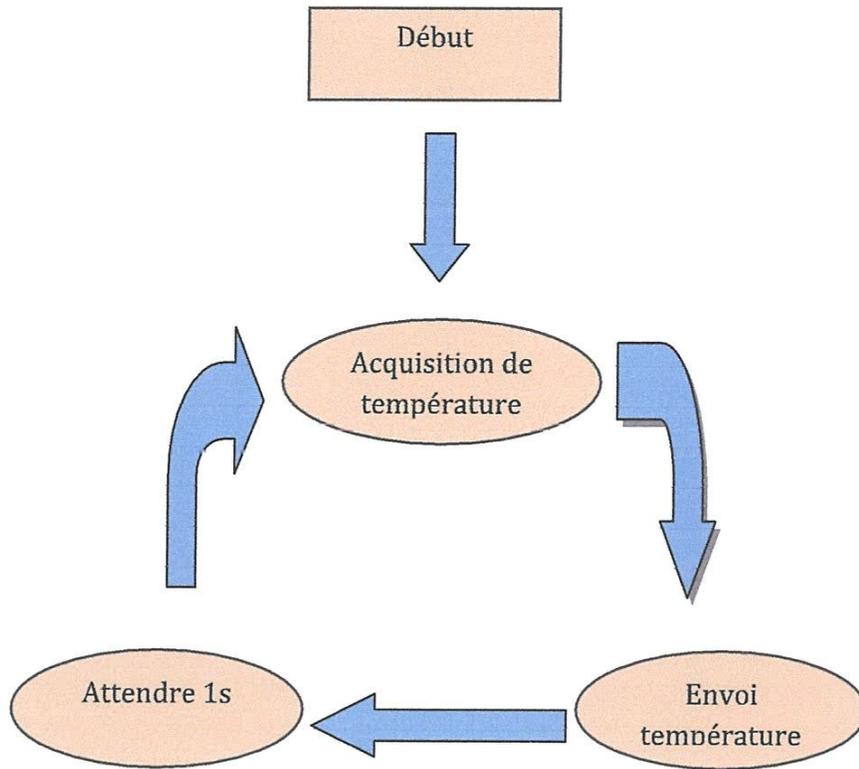


Figure IV .16: Déroulement du programme

Ainsi le code source doit être organisé en trois parties selon la figure suivante:

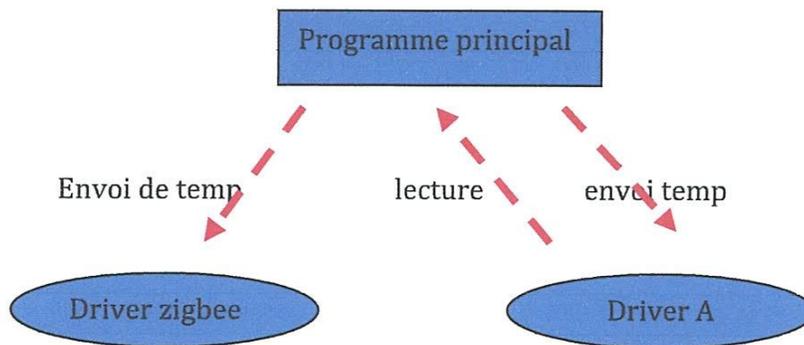


Figure IV.17. Organisation du code

Le programme principal communique avec les deux drivers et synchronise les événements.

- a- **Driver A** : afin de communiquer avec le thermomètre, il faudra d'abord développer les fonctions d'échanges des données pour permettre entre autre, d'envoyer au capteur, des paramètres de configurations, mais aussi des ordres de conversion et d'envoi de température.

- b- **Librairie de la carte** : pour pouvoir communiquer avec la carte zigbee, il est nécessaire de développer des fonctions permettant l'échange de données. Elle doit donc contenir les fonctions suivantes :
 - Initialisation des broche afin d'activer la communication avec ce module.
 - Envoyer un caractère via liaison zigbee vers le PC
 - Permettre de lire un caractère reçu via la liaison zigbee du PC.

- c- **Le programme principal** : le programme principal doit pouvoir effectuer toutes les initialisations des différents modules et lancer ensuite une conversion de température, puis une acquisition de température, la valeur de la température sera ensuite formatée en chaine de caractère pour être envoyée octet par octet vers le PC. Ces opérations seront réitérées toutes les secondes. **Le moniteur zigbee** sur le PC devra donc afficher la valeur réactualisée à chaque seconde. **Ce moniteur n'y est pas inclus pour pouvoir lire la valeur de la température.**

IV.5 Bilan personnel

Après quelques jours de travail, le résultat obtenu me satisfait. Cependant, malgré le fait de ne pas avoir pu pratiquer toute la théorie étudiée et envisagée. J'en avais l'envie de développer un test permettant l'acquisition de température autour de cette technologie, qui aurait pu être implémenté et testé dans un cas concret d'application, mais la documentation que j'ai utilisée ne fournit pas des explications concrètes concernant sa mise en œuvre.

En effet, d'un point de vue recherche, ce sujet m'a permis de progresser avec notamment l'étude de documents scientifiques et de technologies. Ce sujet m'a permis de faire naître, d'étudier et d'amener à maturité un sujet de développement qui m'était cher.

IV.6 Problèmes rencontrés

Le développement de ce test ne fut pas un travail simple bien au contraire, Il m'est arrivé de rester bloqué quelques jours à chercher et essayer de comprendre ce qui n'allait pas du côté acquisition de température. Le test nécessite une bonne lecture des documents, vu que le test ait commencé un peu en retard, environ un mois et demi depuis le commencement. Voici un résumé des problèmes rencontrés par ordre chronologique :

- Comme évoqué précédemment, nous n'avons pas trouvé un moniteur sur la documentation qui pourrait afficher la valeur de la température sur le PC.
- Le test nécessite tout un projet entier pour réussir à comprendre et développer des programmes et logiciels assurant sa mise en œuvre. le temps que nous avons eu ne nous a pas permis d'aller plus loin.

IV.7 Conclusion

Ce test était une occasion de découvrir un nouveau monde des systèmes embarqués avec de la télécommunication. On a pu comprendre les différentes étapes pour construire un réseau radio de capteur sans fil. Sur le plan technique, cette application fut instructive car ça m'a permis d'apprendre la norme 802.15.4 et de mettre en œuvre des communications sans fil zigbee.

De nombreuses applications peuvent être implémentées sur le kit PICDEM Z. Mais reste à exploiter et à comprendre parfaitement le milieu de configuration de ce genre de réseaux sans fil. En effet, les expériences que j'ai effectuées m'ont permis de valider mes objectifs.

J'aurais aimé fournir des résultats plus riches mais faute de temps, cela m'a été impossible.

Conclusion générale

Au terme de ce mémoire, les informations techniques qui viennent d'être présentées, nous ont permis de posséder des connaissances de base et pouvoir apprécier les avantages et les limites des réseaux sans fil ZigBee. Le principal objectif d'un WPAN ZigBee est d'offrir un moyen de communication radio simple et robuste, entre des équipements électriques et électroniques généralement de petite taille et ayant des besoins de communication très ponctuels.

Les travaux exposés dans le présent mémoire s'inscrivent dans le domaine d'une étude des réseaux zigbee : architecture et applications.

Le premier chapitre de ce rapport introduit un état de l'art. Dans un premier temps, les réseaux de capteurs sont brièvement décrits en évoquant leurs principales caractéristiques. Les standards IEEE 802.15.4/ZigBee sont ensuite détaillés, et nous avons profité l'occasion de les différencier. Le problème de coexistence avec les autres standards de la bande ISM 2,4 GHz est évoqué. Enfin, les implémentations nous ont permis d'aborder notre deuxième chapitre.

Le second chapitre s'intéresse ensuite à l'étude des réseaux zigbee. Nous avons en premier lieu, décrit les différentes topologies des réseaux zigbee et avons montré que la norme zigbee prévoit deux topologies : étoile et point à point. Par la suite, une analyse architecturale de la pile protocolaire zigbee a été faite, puis, nous avons passé à une étude de chaque couche de la pile zigbee/IEEE 802.15.4.

Le troisième chapitre présente une étude des simulations portant sur une évaluation de performances. Nous avons mené une étude comparative de protocole de routage OADV à celui de routage hiérarchique. Cette comparaison montre que le protocole de routage hiérarchique présente de caractéristiques intéressantes vu sa simplicité.

Finalement, un test d'application est décrit dans le quatrième et dernier chapitre. L'objectif était bien évidemment de faire communiquer les nœuds et de procéder à un test permettant l'acquisition de température qui, malheureusement n'a pas pu être réalisée. Nous nous sommes focalisés sur le mécanisme de d'association de nœuds afin de comprendre les caractéristiques affectant les problèmes de collisions.

Perspectives

Les résultats obtenus dans ce travail de recherche nous permettent de dégager de nombreuses perspectives.

En effet, un point important, je cite, serait de pouvoir assurer la transversalité de la gestion de qualité de service au travers toute la pile protocolaire, et plus particulièrement avec la couche directement supérieure, la couche réseau.

Concernant la topologie d'un réseau quelconque, il serait intéressant de pouvoir étendre le réseau par la mise en œuvre des topologies moins restrictives qui permettront de rattacher un coordinateur à un autre coordinateur.

D'un point de vue théorique et pratique, je pense avoir mis en avant les problèmes en cours de discussions par l'IEEE que sont le routage et le mécanisme d'évitement de collision.

Bibliographie

- [1]. Adrien VAN DEN BOSSCHE, Eric CAMPO et Thierry VAL. *Réseaux locaux* (extrait) *Technologie ZigBee / 802.15.4, Protocoles, topologies et domaines d'application*, Technique d'ingénieur, 2011. Disponible sur : <https://www.sndl.cerist.dz/>.
- [2]. Drew Gislason. *ZigBee Wireless Networking*, Newnes Publications, 2008. Disponible sur: <http://www.newnespress.com>.
- [3]. Nathalie MITTON. *Réseaux de capteurs sans fil*, Technique d'ingénieur, 10/09/2012. Disponible sur : <https://www.sndl.cerist.dz/>.
- [4]. Shahin FARAHANI. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, Newnes Publications, 2008.

Articles, Mémoires et thèses

- [5]. Adrien VAN DEN BOSSCHE, *Une méthode d'accès totalement déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles*, thèses de doctorat en génie informatique, université de Toulouse II, (2007).
- [6]. Bile NEFZI, *Qualité de service temps réel dans les protocoles IEEE 802.15.4 et Zigbee Et leurs améliorations*. Mémoire de master en Informatique, Université Henri Poincaré-Nancy I. 2007.
- [7]. Miscopein, BENOIT. *Communications radio mobiles des interfaces radio avancées Pour le futur*. Cours dispensé par EEATS Grenoble. Avril 2007.
- [8]. IEEE Computer Society. *IEEE Std 802.15.4-2003 wireless medium access control and Physical layer specifications for low-rate wireless personal area networks*. Std.2003
- [9]. J. Chang et L. Tassiulas, "Energy conserving routing in wireless adhoc networks," 2000.
- [10]. Documentations d'étude de la carte PICDEM Z du laboratoire d'automatique et Robotique. Université 8 mai 1945 Guelma.

Webographie

- [11]. Le site web de la Zigbee alliance : <http://www.zigbee.org>.
- [12]. Le site web de opnet : <http://www.opnet.com>.

Annexe A



L'environnement OPNET (Optimum Network Performance) permet la modélisation et la simulation de réseaux de communication grâce à ses bibliothèques de modèles (routeurs, commutateurs, stations de travail, serveurs ...) et de protocoles (TCP/IP, FTP, FDDI, Ethernet, ATM). Le module Radio OPNET permet la simulation des réseaux de radiocommunication : hertzien, téléphonie cellulaire et satellitaire.

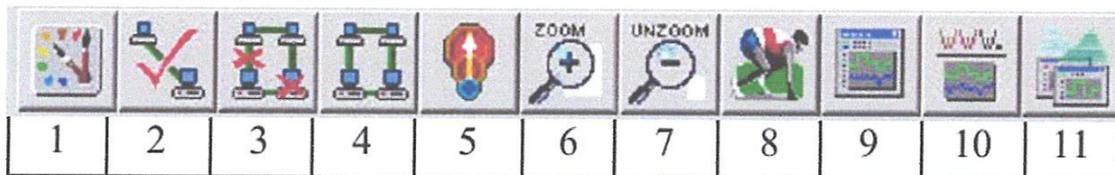
Principales interfaces :

Parmi les nombreuses interfaces que propose OPNET au démarrage, on distingue les interfaces suivantes :

Project Editor, Network Model Editor, Node Model Editor, Process Model Editor, Antenna Pattern, Modulation Curve, Simulation Sequence, Analysis Configuration

Project Editor :

C'est l'interface principale du logiciel. Elle permet d'implanter des modèles issus des bibliothèques OPNET ainsi que des modèles créés par l'utilisateur. Les principales fonctions de cette interface sont disponibles sous formes d'icônes.

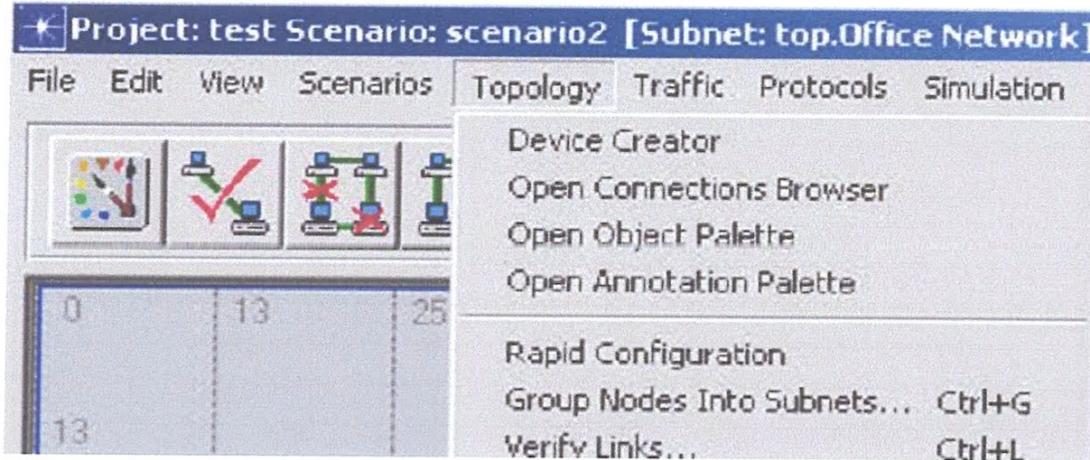


- 1- Ouvrir la palette d'objet
- 2- Vérification des liens
- 3- Mise en panne d'un appareil ou d'un lien
- 4- Remise en marche d'un appareil ou d'un lien
- 5- Retour au réseau supérieur
- 6- 6 / 7- Zoom + /
- 8 -Lancer la simulation
- 9-Visualiser les graphiques et sta
- 10-Visualiser le rapport le plus récent
- 11-Visualiser tous les graphiques

OPNET dispose de trois niveaux hiérarchiques imbriqués : le **network** domain, le **node** domain et le **process** domain.

1- Network Domain

C'est le niveau le plus élevé de la hiérarchie d'OPNET. Il permet de définir la topologie du réseau en y installant des routeurs, des hôtes. Chaque entité de communication (appelée nœud) est entièrement configurable et est définie par son modèle.



2- Node Domain

Le Node domain permet de définir la constitution des nœuds.

3- Process Domain

C'est à ce niveau que l'on définit le rôle de chaque module programmable. Un module possède par défaut un processus principal, auquel peuvent s'ajouter des processus fils accomplissant une sous-tâche précise.

Simulation sous OPNET

OPNET fournit en standard une liste impressionnante d'implémentations de routeurs, de stations de travail, de switches...

On peut donc construire une simulation de réseaux en utilisant principalement deux méthodes :

- En utilisant les nœuds pré-programmés fournis par la librairie de OPNET.
- En commençant tout depuis le début et en définissant soi-même un modèle de lien, des process models décrivant des routeurs et des hôtes...

Résumé

Les réseaux capteur sans fil sont en plein effervescence. Ils possèdent de nombreuses applications telles que des applications militaires, le contrôle de l'environnement géographique ou encore des applications industriels. Ces applications, bien que très différentes, présentent le besoin commun d'être constituées de réseaux composés de nœuds à faible débit, à très faible coût et à très faible consommation énergétique. Dans cette optique, le standard ZigBee a été introduit. Il ajoute aux couches physiques et liaison définies par la norme IEEE 802.15.4, les couches réseaux et applications. Dans ce présent travail, nous étudions les réseaux zigbee. Nous faisons une évaluation des performances ainsi qu'un test d'application permettant d'analyser les mécanismes d'associations.