

Comparaison des standards des télécoms adéquats pour les réseaux des capteurs sans fil

Binda M.L.*

Paper History

Received:
March 29, 2017

Revised:
August 02, 2017

Accepted:
August 17, 2017

Published:
September 2017

ABSTRACT

Comparison of appropriate telecommunication standards for Wireless Sensor Networks

We carried out in this paper a comparison of two wireless communication standards suitable for Wireless Sensor Networks, namely the Zigbee standard (based on the IEEE 802.15.4 standard) and the IEEE 802.15.4a standard based on the Ultra Wide Band "UWB" radio technology. Characteristics and properties, these two standards are part of the standards able to meet tight constraints imposed by wireless Sensors Networks. This comparison is based on qualitative criteria such as coexistence with other wireless communication standards, energy consumption which must be as low as possible in order to optimize the lifetime of the sensor's batteries, spectral efficiency, possibility of localization and positioning as well as the resistance to disturbances due to the propagation channel. The comparison shows that both standards meet the specifications of the wireless sensors networks. However, in an environment where several industrial communications networks coexist, the IEEE 802.15.4a standard will be preferred because of its resistance to interference and its ability to be perceived as noise by other standards. In addition, it allows high data rates while having low power consumption. It offers high localization accuracy and reliability. The Zigbee standard will be preferred in situations requiring rapid network deployment, as the Zigbee standard is widely available on several data processing platforms, mainly because Zigbee alliance promotes the use of this standard.

Keywords:

Sensors, Sensor Networks,
Telecommunication
Standards, Transmission
Channel

¹Département de Génie Electrique et Informatique, Faculté Polytechnique, Université de Kinshasa, Kinshasa, République Démocratique du Congo

* To whom correspondence should be addressed: maloubinda@gmail.com

INTRODUCTION

Les progrès quasi continus dans la microélectronique et dans les MEMS « Micro Electro Mechanics Systems » permettent de réaliser des capteurs pouvant inclure un composant senseur, c'est à dire sensible au phénomène à mesurer, un composant processeur, qui permet de traiter des données recueillies par le senseur et un composant émetteur-récepteur permettant de transmettre ces mesures vers des potentiels utilisateurs et aussi de recevoir des commandes de la part de ces utilisateurs [CHANG *et al.*, 2009].

Ces capteurs dits intelligents peuvent être mis en réseau de manière à leur permettre de couvrir des étendues beaucoup plus grandes et de collaborer dans le processus de mesures des grandeurs physiques [KARA, 2004]. Les réseaux de capteurs ainsi obtenus peuvent être câblés ou sans fils. Les réseaux des capteurs câblés sont limités à des étendues et à un nombre de nœuds relativement faibles ; par contre les réseaux des capteurs sans fils offrent plus de flexibilité dans leur déploiement en s'affranchissant des contraintes liées au câblage, permettant ainsi de couvrir des étendues beaucoup plus grandes avec des configurations de topologie beaucoup plus variées, et un nombre de nœuds plus importants. Cependant, les réseaux des capteurs sont soumis à d'autres contraintes telles que l'autonomie énergétique, ce qui se manifeste par la durée de vie de la batterie alimentant le nœud

capteur, la quantité d'informations qu'un nœud capteur peut transmettre, ce qui se traduit par la disponibilité de la bande passante, l'intégrité des informations à la réception, ce qui se traduit par l'impact du canal de transmission sur les informations qui y transitent, ainsi que le coût du déploiement des réseaux de capteurs.

Toutes les parties constituant un nœud capteur contribuent au bilan énergétique du capteur. En effet, le senseur, qu'il soit actif ou passif nécessite une source d'énergie pour soit alimenter le senseur et/ou le circuit de conditionnement. Le processeur responsable du traitement des mesures recueillies doit également être alimenté, et enfin l'émetteur-récepteur nécessite aussi une alimentation électrique. L'énergie consommée par le senseur, est pratiquement constante, par contre l'énergie consommée par le processeur et par l'émetteur-récepteur dépend énormément du type de standard de télécommunications utilisé [BOUALLEGUE, 2016]. Plusieurs standards de télécommunications sont disponibles sur le marché mais seuls quelques-uns sont susceptibles de répondre aux contraintes imposées par les réseaux des capteurs sans fils. Parmi ces standards on peut citer la norme Ultra Wide Band « UWB » et la norme Zigbee.

Cet article évalue ces deux standards pour leur utilisation dans les réseaux des capteurs sans fils. Cette évaluation porte sur des critères objectifs tels que la consommation énergétique, la bande

passante, la résistance aux interférences, l'empreinte mémoire... [BARONTI et al. 2007].

Le reste de l'article s'articule de la manière suivante : la Section 1 présente les réseaux des capteurs sans fils, suivie de la Section 2 qui traite des standards de télécommunications sans fils, ensuite, la Section 3 fait une étude comparative des standards adéquats et enfin la conclusion et les perspectives futures sont présentées dans la Section 4.

RESEAUX DES CAPTEURS SANS FILS

Les réseaux des capteurs sans fils sont des systèmes de communication (réseaux) sans fils constitués d'un nombre donné des capteurs dotés de capacité de collecter, de traiter et de transmettre les informations sur le phénomène sous observation, lequel peut être un phénomène environnemental, industriel ou de quelle que nature que ce soit [AUQUIER, 2005]. Les réseaux des capteurs sans fils s'apparentent à des réseaux ad hoc dans la mesure où les nœuds constituant le réseau peuvent s'organiser de manière autonome sans une infrastructure préalablement définie, permettant ainsi des topologies multiples entre les différents nœuds, de manière à coopérer dans l'observation du phénomène autour duquel ils sont déployés. Les nœuds capteurs dans le réseau peuvent avoir différentes fonctions, qui sont

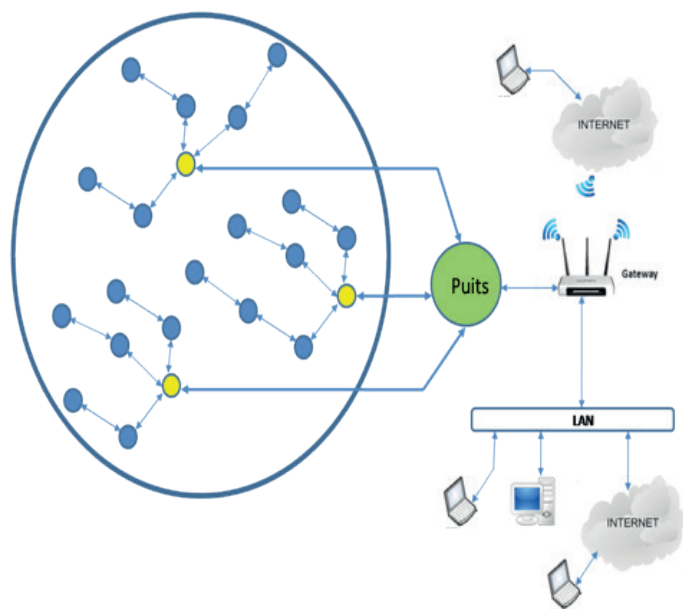


Figure 1| Réseau des capteurs sans fils

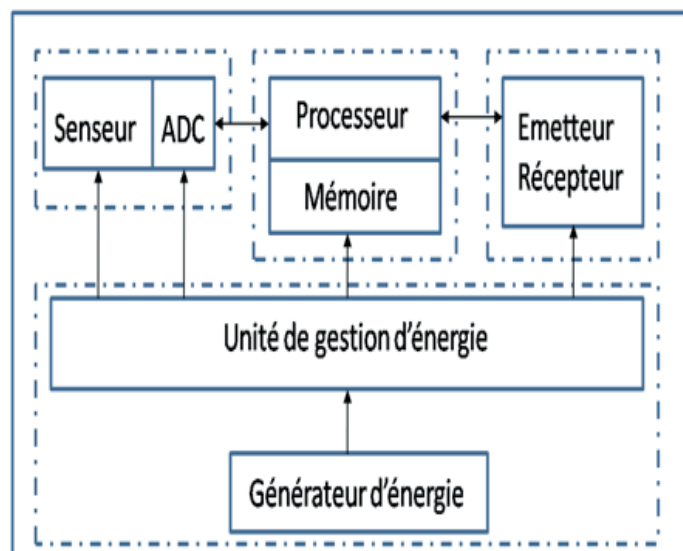


Figure 2| Architecture d'un nœud capteur [CHALLAL et BETTAHAR, 2011]

généralement spécifiées dans le standard mis en œuvre. Ainsi certains nœuds peuvent se limiter à mesurer le phénomène et à transmettre les données collectées, d'autres nœuds peuvent avoir des fonctions consistant à collecter des données en provenance de différents nœuds, avant de les transmettre vers la plateforme de concentration des données, appelée « puits ». La plateforme de concentration est reliée au centre de contrôle du réseau et aux utilisateurs à travers une passerelle, qui peut être un routeur ou un commutateur (Figure 1) [AKYILDIZ et al., 2007].

Un nœud capteur, appelé aussi « Mote » (Figure 2 et Figure 3, est composé essentiellement des entités ci-dessous :

- Un senseur : qui est l'entité responsable de l'observation du phénomène. Il transforme le phénomène observé en signal électrique numérique à travers le convertisseur digital analogique associé.
- Un processeur : c'est l'unité de traitement des données recueillies par le senseur. Il implémente également les couches des protocoles du standard de protocole de télécommunication utilisé.
- Une mémoire de travail : il s'agit d'une mémoire RAM (Random Access Memory) pour le stockage des données et variables pendant l'exécution du programme par le processeur.
- L'unité d'émission et réception : elle implémente la partie radio fréquence du standard de télécommunication.

Une unité d'alimentation électrique : elle fournit l'alimentation électrique à toutes les entités du système. Elle est constituée d'un générateur d'énergie, qui peut être une batterie ou un panneau photovoltaïque, et d'un dispositif de gestion d'énergie qui produit différentes tensions en fonction des spécificités de chaque unité à alimenter.

On peut potentiellement en fonction des besoins, avoir une unité de géo localisation, qui gère la position du nœud dans le réseau.

STANDARDS DES TELECOMMUNICATIONS SANS FILS

C'est vers la fin des années 70 que naissent les systèmes de téléphonie mobile cellulaire. Il s'agit ainsi des systèmes dits de première génération, qui sont entièrement analogiques. Parmi lesquels, on peut citer le système AMPS (Advanced Mobile Phone Service), le système NMT (Nordic Mobile Telephony) ou le système Radiocom2000. Les systèmes de première génération sont caractérisés par des ressources spectrales réduites et une faible autonomie des appareils mobiles. Le caractère totalement



Figure 3.| Nœud capteur Berkeley [BREANNE et MALAN, 2004 ; CROSSBOW TECHNOLOGY INC.]

analogique de ces systèmes a limité leur utilisation dans les applications de transport de la parole.

La seconde génération des systèmes cellulaires est apparue au début des années 90 avec le GSM (Global System for Mobile communications, Europe), le PDC (Japon), et le PCS (États-Unis). Prévue initialement pour des applications de transport de la parole et de données à faibles débits (9600 bits/s) autour des fréquences (935-960 MHz) ou (890-915 MHz), cette norme a permis l'essor des communications mobiles.

Le caractère numérique de cette génération a permis d'envisager d'autres applications se rapportant aux données autres que la voix. Ainsi a vu le jour le protocole Wireless Application Protocol (WAP), permettant de pouvoir se connecter sur internet à travers un mobile GSM. Cependant l'empreinte mémoire des différentes couches de ces systèmes, ainsi que les contraintes d'autonomie sur les sources d'énergie sont parmi les contraintes qui ne permettent pas leur utilisation dans les réseaux des capteurs.

Les systèmes de troisième et quatrième génération, bien qu'orientés essentiellement « données » et leur caractère multimédia, avec des débits élevés de transfert des données souffrent des mêmes contraintes que leurs prédécesseurs de la deuxième génération quant à leur utilisation dans les réseaux des capteurs.

Malgré toutes ces avancées technologiques, tous les standards des réseaux de télécommunications cellulaires ne sont pas en mesure de répondre efficacement aux différentes contraintes qu'imposent les réseaux des capteurs telles que la consommation d'énergie, qui dépend fortement du type de standard de télécommunication utilisé pour assurer la transmission des données, le besoin d'une grande précision pour la synchronisation des données, d'un bon mécanisme de coexistence,... [RAWAT *et al.* 2004].

Cependant, à côté des réseaux des télécommunications cellulaires, se sont développés d'autres standards découlant de la famille IEEE 802 (l'Institut des Ingénieurs Electriciens et Electroniciens ou en anglais Institute of Electrical and Electronics) incluant aussi bien les réseaux locaux filaires « LAN » que les réseaux locaux sans fils « WLAN ».

En fait, les réseaux locaux sans fils de la famille IEEE 802 sont regroupés en fonction de leur taille.

Ainsi, on a la classification suivante :

- Les WLAN ou Wi-Fi qui sont constitués autour de la norme IEEE 802.11 et ses variantes ;
- Les WPAN (*Wireless Personal Area Network*) qui incluent les normes IEEE 802.15 avec ses différentes variantes comme IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (Zigbee), IEEE 802.15.4a (UWB), etc.,

- Les WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) aussi connus sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR), qui sont basés sur la norme IEEE 802.16. La norme de réseau métropolitain sans fil la plus connue est le WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*)
- Les WRAN (*Wireless Regional Area Networks*) qui sont constitués autour de la norme IEEE 802.22

En effet, toutes ces technologies rencontrent plusieurs défis: les exigences en matière de qualité de service (QoS), les architectures et protocoles évolutifs et flexibles pour supporter des applications hétérogènes, le traitement localisé et la fusion de données, la conception d'efficacité énergétique, la fiabilité et la tolérance aux pannes, la couverture multimédia, la demande en bande passante élevée, la consommation d'énergie, etc. [AKYILDIZ ET KASIMOGLU, 2004].

Concernant l'utilisation de ces normes dans les réseaux des capteurs, seules quelques unes de ces exigences peuvent être prises en compte et implémentées ; c'est le cas par exemple de la norme MI-WI (Microchip Wireless) qui est une version allégée de la norme 802.15.4, permettant de faire aussi bien du point à point (Peer to Peer) que d'autres topologies (Maille, étoile, arbre) et pouvant donc être utilisée dans les systèmes dont les ressources de calcul sont limitées et les modules radio fréquences de faible puissance [FOERSTER ET LI, 2004].

Il s'ensuit donc que parmi les normes sans fil de la famille IEEE 802, seules les normes WPAN conçues dans le cadre d'un environnement faible puissance de consommation, faible débit ou haut débit suivant l'efficacité spectrale sont les plus adéquates.

Nous nous focalisons donc sur les normes IEEE 802.15.4 (Zigbee) pour la faible puissance et le faible débit d'une part, et d'autre part IEEE 802.5.4a (UWB) pour sa très faible consommation, son débit binaire couvrant une plage allant du faible débit vers des débits relativement élevés. Ces deux standards sont donc parmi les normes de télécommunications sans fils les plus susceptibles de répondre aux exigences des réseaux des capteurs [LEE *et al.*, 2007].

ZIGBEE ou Norme IEEE 802.15.4

Le standard Zigbee constitue en fait un ensemble des protocoles bâtis autour de la norme IEEE 802.15.4. Ces protocoles sont spécifiés par l'organisme « Alliance Zigbee » qui regroupe plusieurs entreprises essentiellement spécialisées dans les systèmes et circuits électroniques, informatiques et télécommunications. Le standard Zigbee est conçu pour réaliser des réseaux sans fils « WPAN » avec une connectivité fiable et efficace, une faible consommation (faible puissance), un débit faible, une latence faible et un coût faible. Ces caractéristiques s'ajustent parfaitement avec les exigences des réseaux des capteurs

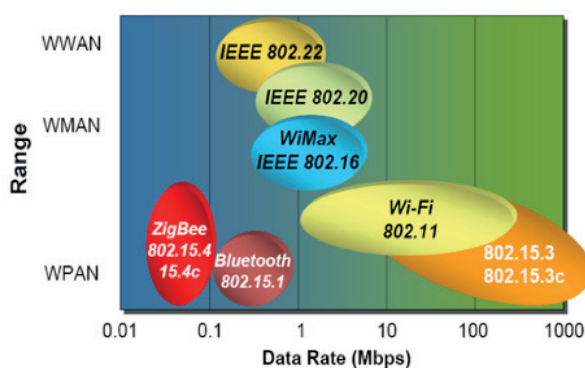


Figure 4| Comparaison des Technologies sans fil [HEILE, 2007]

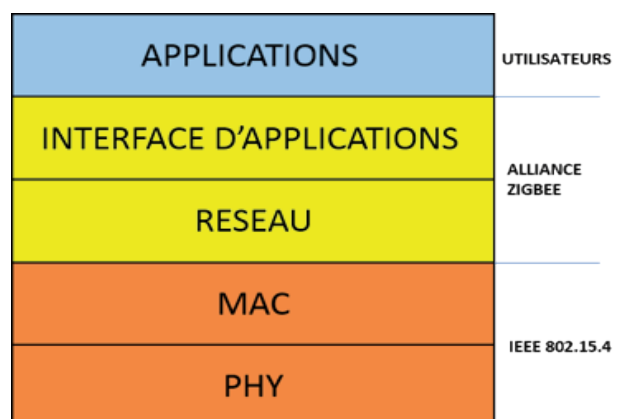


Figure 5| Modèle en couche Zigbee

sans fils [MIHAJLOV ET BOGDANOSKI, 2009].

Comme la plupart des standards des télécommunications, le standard Zigbee est aussi organisé suivant le modèle en couche. Son architecture en couche est montrée sur la **Figure 5**. Les couches basses, à savoir la couche physique et la couche MAC sont spécifiées par la norme IEEE 802.15.4. Les couches restantes (couche de haut niveau) à savoir la couche réseau, la couche interface d'application sont spécifiées par l'alliance Zigbee, et la couche profil d'applications est réservée aux développeurs d'applications.

Dans le cadre de cet article, nous présentons seulement les couches réseau et physique, lesquelles permettent de fournir des éléments de comparaison avec d'autres standards. La couche réseau du standard Zigbee est responsable des opérations de la gestion du réseau, comme par exemple assurer la sécurité et le routage des échanges entre les nœuds du réseau et l'identification des nœuds rejoignant ou quittant le réseau. La couche réseau définit trois types des nœuds dans un réseau Zigbee [OMOJOKUN, 2015], à savoir:

- Zigbee Coordinator (ZC)
- Zigbee Router (ZR)
- Zigbee End Device (ZED)

Le « Zigbee Coordinator » ou ZC, est le nœud autour duquel le réseau Zigbee est construit. Il n'y a qu'un seul ZC dans un réseau Zigbee. Le ZC assure la coordination du réseau, l'intégration de nouveaux nœuds et l'exclusion des nœuds dans le réseau. Il est doté des capacités de routage.

Le « Zigbee Router » ou ZR, est un nœud routeur qui s'associe

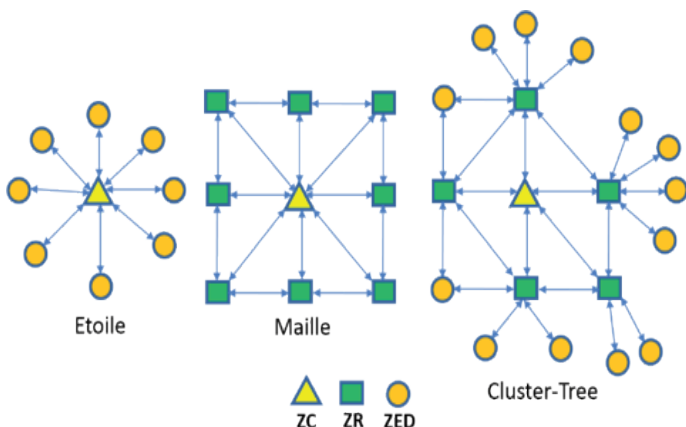


Figure 6 | Topologies dans un réseau Zigbee

au nœud ZC pour réaliser les différentes topologies supportées par le standard Zigbee. Il permet de jouer le rôle de coordination au niveau local. Il peut exister plusieurs ZR dans un réseau Zigbee.

Le « Zigbee End Device » ou ZED, est un nœud simple qui s'associe à un ZC ou un ZR. Il ne dispose d'aucune capacité de routage ou de gestion du réseau. Il agit juste comme un nœud source ou destination des communications.

A travers ces trois nœuds, le standard Zigbee supporte trois types de topologie à savoir la topologie « Etoile », la topologie « Maille ou Mesh » et enfin la topologie « Cluster-Tree » comme le montre la **Figure 6**.

La couche physique est responsable de la transmission et de la réception des données. Elle spécifie les bandes des fréquences à utiliser, le taux d'étalement et les débits des données correspondant à chaque bande de fréquences, le nombre des canaux radio pour chaque bande des fréquences, le type de modulation, etc. Ces spécifications sont résumées dans le **Tableau 1** [OMOJOKUN, 2015].

L'architecture de la couche physique est présentée à la **Figure 5**, laquelle décrit le schéma bloc d'un émetteur alors que la **Figure 6** décrit le récepteur Zigbee.

Tableau 1 | Couche physique Zigbee

Fréq.	Bande des Fréq.	Modulation	Etalement (Kchip/s)	Débit (Kbps)
868 MHz	868-870 MHz	BPSK	300	20
915 MHz	902-928 MHz	BPSK	600	40
2.4 GHz	2.4-2.4835 GHz	O-QPSK	2000	250

Pour l'émetteur, considérons le cas de l'utilisation de la bande de fréquence de 2.4 GHz. Les 4 bits de chaque octet du train binaire (Protocole PPDU) correspondent en un symbole. Dès lors pour chaque symbole, une séquence PN (Pseudo-random Noise ou bruit pseudo-aléatoire) de 32 chips est transmise vers le démultiplexeur, lequel sépare les composantes en phase des composantes en quadrature. Puisque le standard impose 2 millions des chips par seconde pour la modulation O-QPSK, on retrouve aisément le débit binaire qui vaut 250 kbps [STANDARD IEEE 802.15.4]. On définit alors le gain de traitement comme « étant le rapport entre le débit des chips et le débit binaire.

$$Gain(dB) = 10 \times \log_{10} \frac{\text{débit Chips}}{\text{débit binaire}} \quad (1)$$

Ainsi dans le cas de Zigbee 2.4 GHz, le débit Chips est de 2 000 Kchips/s, le débit binaire est de 250 Kbps, il s'ensuit donc un gain de 9 dB.

La forme d'onde du signal Zigbee à la sortie de l'antenne est exprimée par l'expression ci-dessous [SHAHIN F., 2008]:

$$x(t) = [x_i \cos 2\pi f_c t + x_q \sin 2\pi f_c t] \sin \pi \frac{t}{2T_c} \quad (2)$$

avec f_c la fréquence de la porteuse en Hertz et T_c la largeur de l'impulsion du chip.

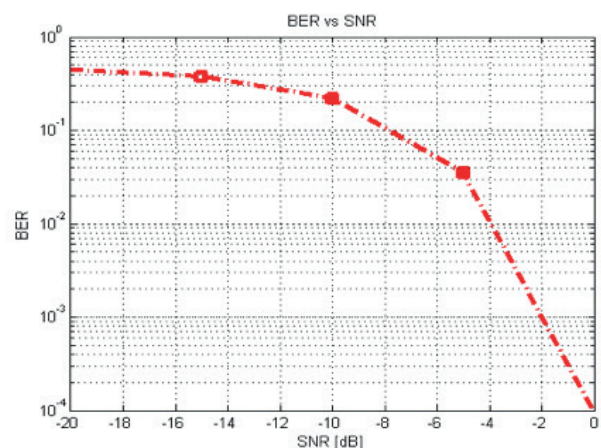


Figure 7 | Taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal à Bruit (SNR).

Un modèle de la couche physique a été développé et simulé sous Matlab. La **Figure 7** ci-dessous présente une métrique importante d'une chaîne de transmission, à savoir le taux d'erreur binaire (BER) en fonction du rapport signal à Bruit (SNR) pour un canal de type Gaussien avec bruit blanc additif.

La courbe présentée à la **Figure 7** montre bien la robustesse de Zigbee face aux interférences et autres erreurs qui peuvent être

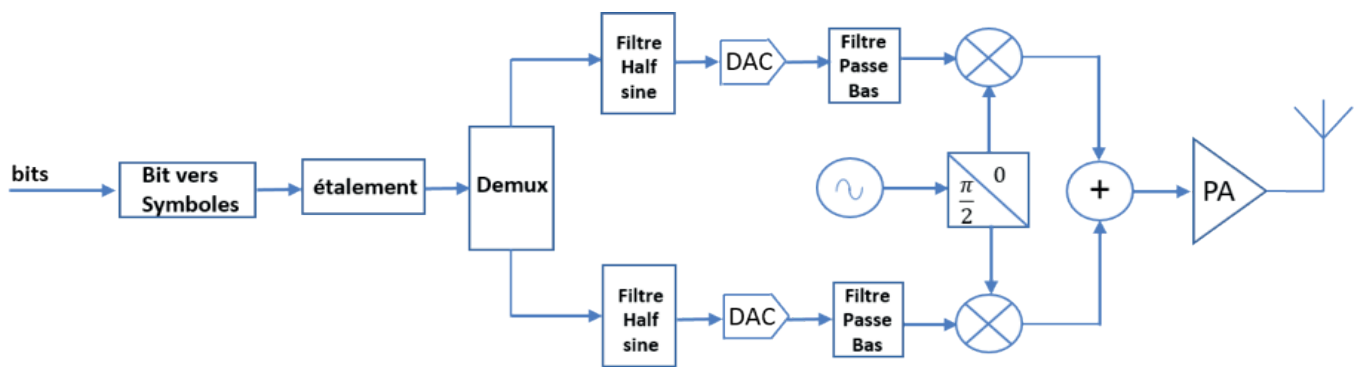


Figure 8| Architecture émetteur Zigbee

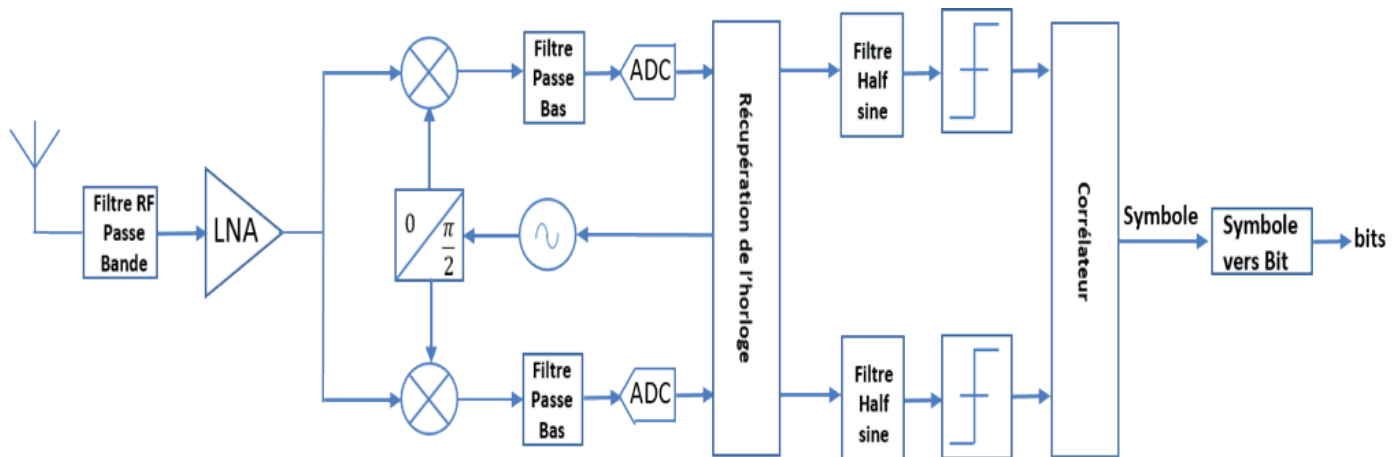


Figure 9| Architecture récepteur Zigbee

dues au canal de propagation. En effet, pour un rapport SNR de 0 dB, c'est-à-dire que le niveau du bruit étant au même niveau que le signal utile, on a un taux d'erreur de 1 bit sur 10000 bits.

Norme IEEE 802.15.4a

La norme IEEE 802.15.4a est une amélioration de la norme IEEE 802.15.4 qui a été conçue dans le but de spécifier une nouvelle couche physique, essentiellement pour les réseaux des capteurs sans fils et devant fournir des performances supérieures à celles de la couche physique du standard IEEE 802.15.4. Elle introduit deux nouvelles couches physiques, l'une basée sur la technologie radio UWB, et l'autre basée sur la technologie radio d'étalement de spectres CSS (Chirp Spread Spectrum). Ces deux couches physiques permettent aux réseaux faible débit PAN d'atteindre des débits relativement élevés et, pour la couche physique basée sur UWB de pouvoir supporter des applications nécessitant la géolocalisation ou la détection en utilisant les mesures de distances [GEZICI *et al.*, 2005]. La norme IEEE 802.15.4a supporte toutes les fonctionnalités de la norme IEEE 802.15.4.

du modèle en couche de la norme IEEE 802.15.4a.

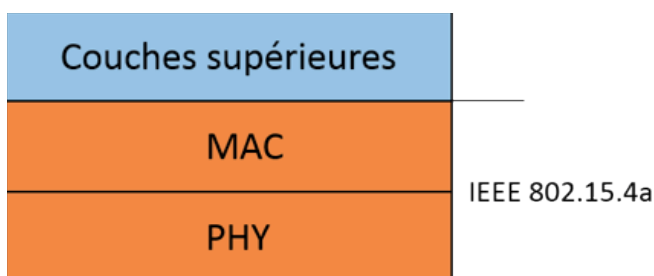


Figure 10| Topologies dans un réseau Zigbee

Ainsi son modèle en couches suit pratiquement la même structure que celui de la norme IEEE 802.15.4. Il y a cependant des modifications au niveau de la couche MAC pour prendre en charge la nouvelle couche radio. La Figure 10 donne un aperçu

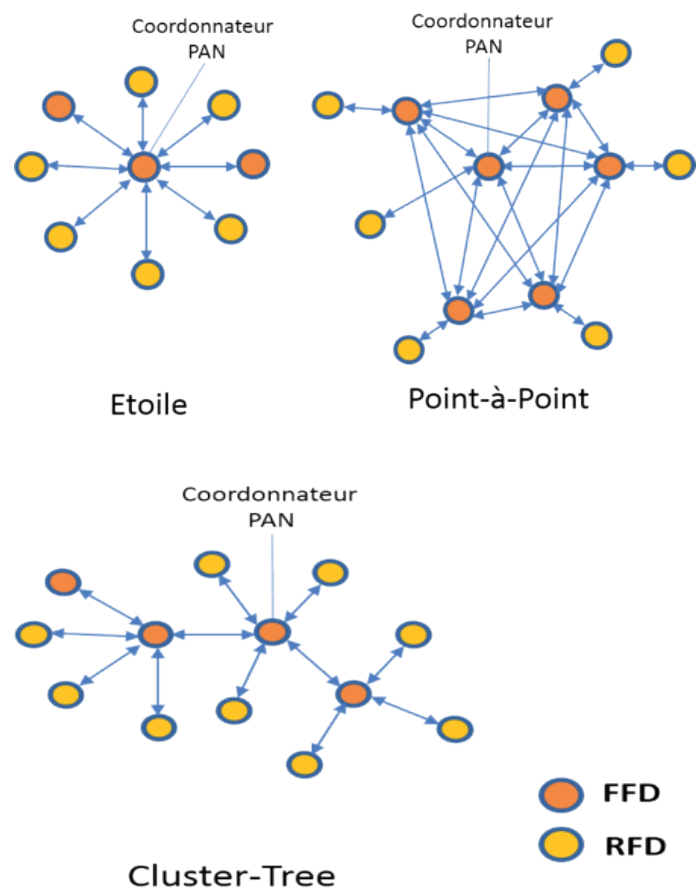


Figure 11| Topologies réseau IEEE 802.15.4a

Les couches supérieures comprennent la couche réseau et la couche application. La couche réseau est responsable de la gestion du réseau constitué par les différents nœuds et du routage des données entre ces différents nœuds. La norme définit deux types de nœuds dans un réseau : le nœud complet et le nœud réduit.

Nœud complet ou Full Function Device (FFD)

Il s'agit d'un nœud implémentant la totalité de la spécification de la norme IEEE 802.15.4a et qui peut soutenir trois modes d'opération selon le rôle lui attribué, à savoir :

- Coordonnateur PAN: c'est le contrôleur principal du PAN. Ce dispositif identifie son propre réseau, auquel d'autres dispositifs peuvent être associés.
- Coordonnateur : qui fournit des services de synchronisation par la transmission des trames balises. Chaque coordonnateur doit être associé à un coordonnateur PAN. Il n'a pas la possibilité de créer son propre réseau.
- Un simple nœud : qui ne possède pas les fonctionnalités précédentes. Il représente un simple nœud associé à un coordonnateur ou à un coordonnateur PAN.

Nœud réduit ou Reduced Function Device (RFD)

Il s'agit d'un nœud opérant avec l'implémentation minimale de la norme IEEE 802.15.4a. Un RFD est prévu pour les applications extrêmement simples, comme par exemple un simple capteur. Les RFDs peuvent s'associer à un seul FFD et ils ne sont pas obligés d'envoyer de grandes quantités d'informations.

La norme supporte trois types de topologies : étoile, point à point (peer to peer), et enfin la topologie «Cluster-Tree » comme le montre la **Figure 8**.

La couche application définit les fonctions de chaque nœud dans le réseau. C'est donc à ce niveau qu'est défini le type d'un nœud dans un réseau IEEE 802.15.4a.

La couche MAC quant à elle fournit les différents services d'accès à la couche physique et implémente le protocole MAC.

La couche physique est basée sur deux technologies radios : la technologie Ultra-Wide Band « UWB », et la technologie d'étalement de spectre « ChirpSpread Spectrum » ou « CSS ». Les différences fondamentales entre ces deux couches physiques se situent au niveau des fréquences de fonctionnement et du débit. La couche physique basée sur la technologie UWB propose trois bandes de fréquences distinctes : à savoir une bande en dessous du Gigahertz allant de 250 à 750 MHz, une bande basse entre 3244-4742 MHz et une bande haute allant de 5944 et 10234 MHz.

La couche physique basée sur le CSS par contre, spécifie une seule bande de fréquence au tour de 2.4 GHz.

L'autre différence majeure se situe au niveau des débits permis par chaque couche physique. La couche physique basée sur UWB permet un débit nominal de 851 Kbps, et des débits optionnels de 110 Kbps, 6.81 Mbps et 27.24 Mbps. La couche physique basée sur CSS fournit un débit nominal de 1 Mbps, et un débit optionnel de 250 Kbps.[ZHANG et al., 2009]. Le **Tableau 2** résume les différentes caractéristiques de ces deux propositions. Nous décrirons plus en détails la technologie UWB dans la section suivante.

Technologie UWB

Le terme UWB regroupe les systèmes de communications dont la bande passante est supérieure à 500 MHz. Il en existe plusieurs variantes. Dans le cadre de cet article nous considérons les systèmes UWB à base d'impulsions ou IR-UWB. En effet, la technologie IR-UWB est basée sur la transmission d'une série d'impulsions de très courtes durées (de l'ordre de nanoseconde) et de faible puissance. Il en résulte donc une bande passante très large, avec des avantages tels que : des très hauts débits, une résistance à l'évanouissement dû aux chemins multiples, une très

faible consommation d'énergie et une architecture émetteur-récepteur simple et de faible coût [SOLDA et al., 2011].

Tableau 2| Couche physique IEEE 802.15.4a

	UWB	CSS
Bande des Fréquences	250-750 MHz	2400-2483.5 MHz
	3244-4742 MHz	
	5944-10234 MHz	
Canaux	16	14
Débit	110 kbps	1 Mbps
	851 kbps	
	6.81 Mbps	250 kbps
	27.24 Mbps	
Modulation	BPPM-QPSK	DPSK
Géolocalisation	oui	non
Portée	10 -100 m	

La forme d'une impulsion UWB doit satisfaire aux contraintes imposées par les organismes de régulation ;il en existe plusieurs. Dans le cadre de cet article, nous retenons l'impulsion gaussienne, du fait de la simplicité de sa génération. La fonction gaussienne permettant de générer l'impulsion gaussienne est donnée par la formule 3 [ZHANG et al., 2009] :

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (3)$$

Où, σ est un paramètre lié à la largeur de l'impulsion. L'impulsion gaussienne est donc la dérivée première de la fonction gaussienne.

Sa forme est donnée sur la **Figure 12**.

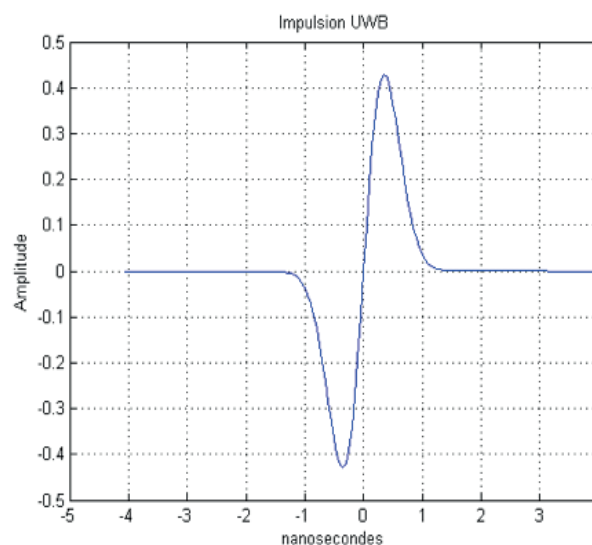


Figure 12| Impulsion gaussienne

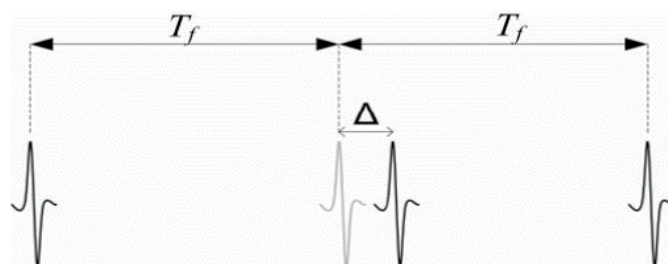


Figure 13| Modulation BPPM

Plusieurs types de modulations peuvent être utilisés pour transmettre les impulsions UWB. Pour le cas de la norme IEEE

802.15.4.a UWB, deux types de modulations sont combinées, à savoir la modulation Binary Position Pulse Modulation « BPPM » et la modulation Quadrature Phase Shift Keying « QPSK ». Nous illustrons la modulation BPPM, qui consiste à introduire un décalage de la position de l'impulsion selon que le bit transmis est 0 ou 1 comme le montre la **Figure 13**. Avec la durée ou la période de transfert des données, le décalage ou l'index de modulation [OPPERMANN *et al.*, 2004].

Ainsi, l'expression d'un train d'impulsions modulées en BPPM est donnée par l'expression suivante :

$$x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{E_b} p(t - iT_f - b_i \Delta) \quad (4)$$

Avec

- E_b : énergie par bit ou énergie par impulsion, exprimée en Joule
- $p(t)$: la forme de l'impulsion gaussienne
- T_f : la période de répétition de la trame d'impulsions, exprimée en seconde
- b_i : bit à transmettre
- Δ : le retard entre les deux états de la modulation PPM, exprimé en seconde.

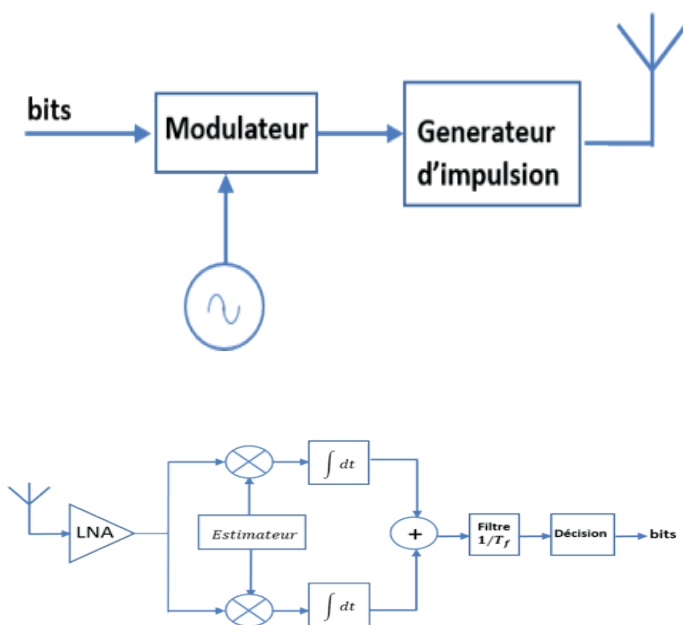


Figure 14| Emetteur-Récepteur UWB [STOICA *et al.*, 2005].

L'architecture d'un émetteur – récepteur IR-UWB est donnée à la **Figure 14**:

ETUDE COMPARATIVE

Les deux standards que nous venons de décrire sont tout à fait indiqués pour les réseaux des capteurs. Cependant en fonction des spécificités et de chaque standard, il y a des applications pour lesquelles un standard sera préféré par rapport à l'autre [MILENKOVIĆ *et al.*, 2006 ; WHEELER, 2007 ; ALEMDAR ET ESROY, 2010].

La comparaison que nous nous proposons d'effectuer repose sur les paramètres se rapportant à la coexistence avec les autres standards, à l'efficacité énergétique, à l'efficacité spectrale, au débit, à la couverture (portée) et aux possibilités d'extension vers l'internet des objets.

Coexistence avec les autres standards

Les deux standards sont spécifiés par l'organisme de standardisation IEEE, lequel a aussi spécifié d'autres standards qui peuvent coexister avec eux, comme le WiFi (Wireless Fidelity) (IEEE 802.11.b/g/n). A côté des standards IEEE, il y a d'autres standards comme ceux de la troisième et quatrième génération (3G et 4G) qui peuvent fonctionner dans la même bande des fréquences que les deux standards ciblés. Pour cette étude, nous nous sommes proposés de faire la comparaison de coexistence uniquement avec le réseau WIFI, qui partage pratiquement le même spectre fréquentiel que le standard Zigbee, et qui dans la version 2.4 GHz est la plus répandue. En effet, la norme Zigbee est principalement déployée dans la bande de fréquences de 2.4 GHz pour tirer profit d'un débit binaire relativement appréciable pour des faibles puissances mises en œuvre. Et dans le cas d'un réseau des capteurs en milieu industriel ou en entreprise, il est donc tout à fait probable que les deux standards coexistent. La **Figure 15** montre le spectre radio de ces deux normes [KE *et al.*, 2009].

On peut directement remarquer que les canaux WIFI peuvent couvrir ou chevaucher complètement les canaux Zigbee, ce qui peut avoir comme conséquences la perte totale des paquets Zigbee ou carrément l'échec d'établissement d'une transaction d'échanges des données. La **Figure 15** montre clairement qu'en présence du WIFI, seuls 4 canaux Zigbee peuvent être utilisés avec succès. Il en résulte une perte de la bande passante. Il y a donc lieu d'examiner avec soin les canaux à utiliser pour permettre aux deux standards de coexister. Par contre le standard IEEE.802.15.4a dans bande des fréquences autour de 3 GHz peut coexister sans s'interférer avec le standard WIFI. En outre, la faible puissance des signaux UWB fait qu'ils s'apparentent à du bruit pour les réseaux WIFI.

Dès lors dans un environnement de déploiement où le réseau WIFI est prépondérant, on privilégiera la norme IEEE.802.15.4a pour les réseaux des capteurs. Dans le cas où il faudra nécessairement utiliser le standard

Zigbee, des précautions particulières doivent être prises dans l'utilisation des canaux de fréquences, et aussi dans le niveau

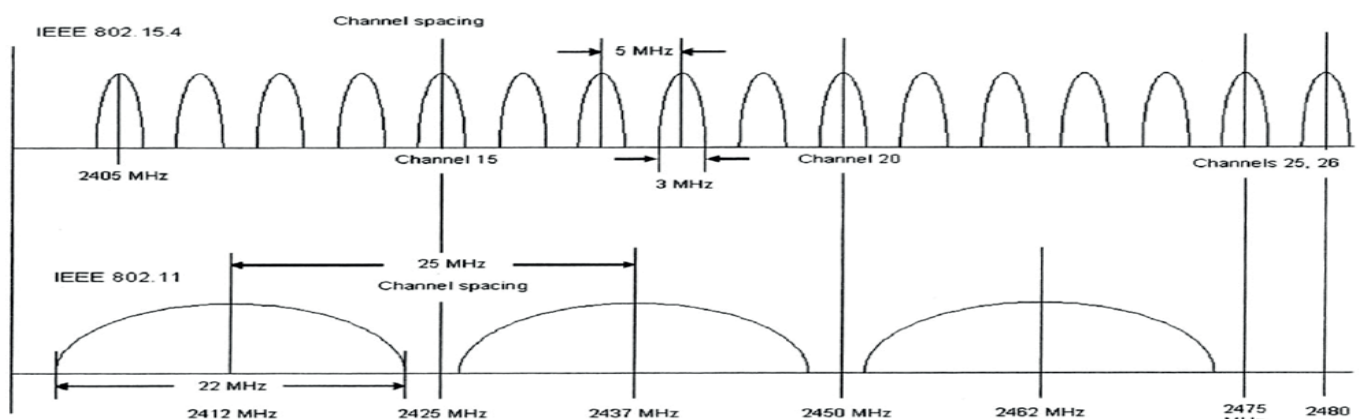


Figure 15| Spectre radio Zigbee et WIFI

de puissance pour éviter des possibles interférences [LIN *et al.*, 2007].

Efficacité spectrale

L'efficacité spectrale est définie comme étant le rapport entre le débit binaire effectif et la bande de fréquence du signal comme exprimé par l'équation 5

$$N(\text{bits/s/Hz}) = \frac{D_b}{B} \quad (5)$$

En considérant le débit binaire maximum dans les deux normes, notamment dans la bande de 2.4 GHz pour le Zigbee, et la bande de 3 GHz pour l'IEEE 802.15.4a, le standard Zigbee a une efficacité spectrale légèrement plus élevée que le standard IEEE 802.15.4a. En effet, la bande passante d'un canal étant de 3 MHz pour le Zigbee, avec un débit de 250 Kbps, on arrive à une efficacité spectrale de 0.085 bit/s/Hz. Et pour le IEEE 802.15.4a, la bande passante du canal est de 500 MHz, en considérant le débit binaire de 27.24 Mbps, on arrive à une efficacité spectrale de 0.057 bit/s/Hz

Efficacité énergétique et durée des batteries

Les deux standards ont été spécifiés pour opérer avec des puissances faibles. Pour le standard Zigbee, la puissance radio maximale n'est pas directement définie dans le standard IEEE 802.15.4 sur lequel est basée le standard Zigbee, seule la puissance minimale est spécifiée; elle est de 0.5 mW, soit -3 dBm. Il revient donc à chaque organisme de standardisation de fixer le seuil maximum. Dans le cas de l'organisme européen ETSI, la puissance radio maximale du Zigbee est fixée à 100 mW soit 20 dBm [ETSI EN 300 328 V 1.7.1 (2006-05)]. La puissance électrique consommée est subdivisée en deux composantes : la puissance consommée lors d'une transmission ou réception des données et la puissance consommée en mode veille. Les mesures effectuées montrent que sous 3.3 V, le courant consommé pendant une transaction d'une durée de 250 ms, se répartit comme suit : 9.3 mA durant la période active et 4.18 µA durant la période de veille [DEMENTYEV, 2013]. Ces valeurs dépendent de la fréquence d'horloge à laquelle est cadencé le microcontrôleur implémentant la pile des protocoles du standard. Connaissant le courant consommé et la capacité des batteries, on peut estimer la durée de vie des batteries en déterminant le temps requis pour transmettre une trame de N octets. Pour la norme IEEE 802.15.4a, le nombre des circuits implémentant la norme est encore très faible, quelques valeurs trouvées dans la littérature proviennent essentiellement de l'émetteur IR-UWB proposé par IMEC (Institut Microélectronique et Composants)

D'une manière générale, le courant moyen consommé durant une période de transmission T est donné par l'équation 6 [ANASTASI *et al.*, 2009].

$$I_m = \frac{I_a T_a + I_v T_v}{T} \quad (6)$$

Où I_a et I_v sont respectivement les courants consommés en mode actif et en mode veille. T_a est le temps de fonctionnement en mode actif, c'est-à-dire le temps requis pour transmettre les données. T_v est le temps de fonctionnement en mode veille. T est la période entre les transmissions des données, c'est-à-dire.

Le temps requis T pour transmettre une trame de N octets est donnée par l'équation 7 [STANDARD IEEE 802.15.4].

$$T_a = \frac{8x(N+31)}{\text{débit}} \quad (7)$$

La durée de vie de la batterie, notée DV, exprimée en années est donnée par l'équation 8.

$$DV = \frac{C}{I_m} \times \frac{1}{24 \times 365} \quad (8)$$

L'équation 6 peut être exprimée en fonction de la période active et de la période de fonctionnement. On obtient ainsi :

$$I_m = I_a \frac{T_a}{T} + I_v (1 - \frac{T_a}{T}) \quad (9)$$

La Figure 16 montre l'évolution de la durée de vie des batteries et du courant moyen consommé en fonction de la période de fonctionnement d'une transaction (incluant le temps actif et le temps de veille).

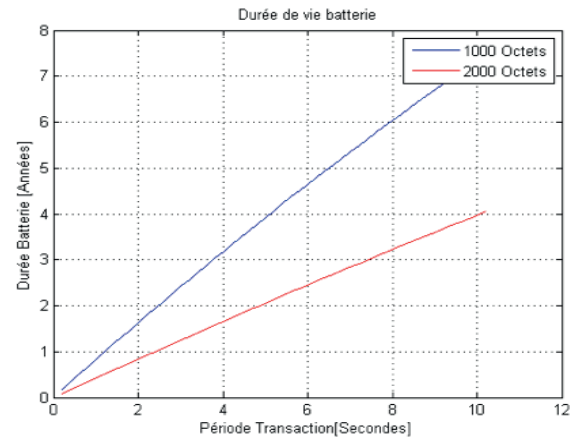


Figure 16| Durée de vie de batterie

En l'absence des données de mesures représentatives pour le standard IEEE 802.15.4a, nous ne représentons ici que les courbes du standard Zigbee. Pour un débit donné, plus la période des transactions est élevée, plus grande est la durée des batteries et plus faible est la consommation d'énergie [ANASTASI *et al.*, 2009].

Etant données les spécifications de la norme IEEE 802.15.4a, la durée de vie des batteries et la consommation du courant devraient être meilleures par rapport aux résultats du standard Zigbee.

Débit binaire et durée de transmission

Le débit maximum pour le standard Zigbee est de 250 Kbps, alors que pour le standard IEEE 802.15.4a, basé sur la technologie radio UWB, le débit maximum est 27.24 Mbps. Le débit binaire détermine la durée de transmission lors d'un transfert des données entre nœuds dans le réseau. Ainsi la durée de transmission, notée T_{TX} , exprimée en microseconde, est donnée par la formule suivante :

$$T_{TX} = (N_{data} + (\frac{N_{data}}{N_{MaxPayload} \times N_{Maxoverhead}})) \times T_{bit} + T_{prop} \quad (10)$$

Où :

- N_{data} est la taille des données à transmettre, exprimée en Octets
- $N_{MaxPayload}$ est la taille maximale du champ des données,
- $N_{Maxoverhead}$ est la taille maximale de l'overhead
- T_{bit} est la durée du bit, exprimée en microsecondes
- T_{prop} est le temps de propagation entre deux nœuds

Les paramètres $N_{MaxPayload}$, $N_{Maxoverhead}$ et T_{bit} sont spécifiés dans la norme. Le paramètre T_{prop} est généralement négligé dans le calcul, car la distance entre deux nœuds dans un réseau des capteurs est généralement de l'ordre du mètre. En considérant les paramètres

standards spécifiés dans la norme, à savoir

$N_{MaxPayload} = 102$ octets, $N_{Maxoverhead} = 31$ octets et $T_{bit} = 4\mu s$ pour le standard Zigbee, et pour le IEEE 802.15.4a standard UWB $N_{MaxPayload} = 1209$ octets, $N_{Maxoverhead} = 42$ octets et $T_{bit} = 0.009\mu s$ octets, et [STANDARD IEEE 802.15.4; KARAPISTOLI, 2010]. On peut dès lors montrer l'évolution de la durée de transmission en fonction de la taille des données à transmettre (Figure 17). On constate donc que la norme UWB du fait de son débit maximum élevé a une durée de transmission beaucoup plus faible par rapport au standard Zigbee. Ceci s'explique également par le fait que la durée bit dans la norme UWB est de l'ordre de nanosecondes alors que cette durée est de l'ordre de la microseconde pour le Zigbee.

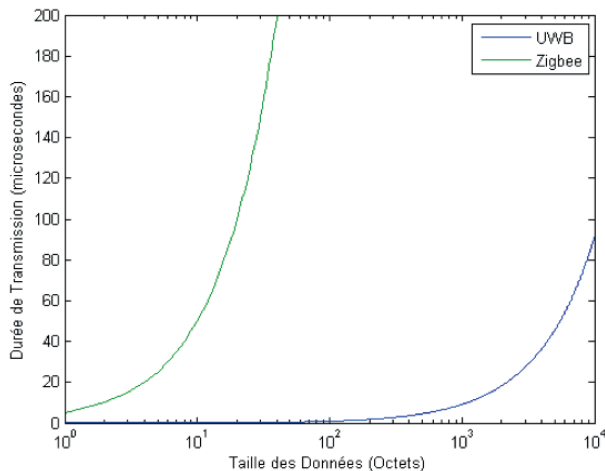


Figure 17| Durée de Transmission en fonction de la taille des données

Le Tableau 3 résume d'une manière succincte la comparaison entre les deux standards [JIN-SHYAN *et al.*, 2007].

Tableau 3| Tableau comparatif des Technologies ZigBee et UWB

Critères de comparaison	Zigbee	UWB
Portée (m)	~30 – 75+	~10
Durée de vie Batteries (années)	Elevée (2 à 3 années)	Très élevée (plusieurs années)
Consommation électrique	Faible	Très faible
Géolocalisation	Faible	Très précise et fiable (moins de 1 m)
Débit binaire max	250 Kbps	27.24 Mbps
Durée de Transmission	Faible	Très faible

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons comparé les standards des télécommunications IEEE 802.15.4 (Zigbee) et IEEE 802.15.4a (UWB), qui sont les mieux adaptés pour répondre aux contraintes qu'imposent les réseaux des capteurs sans fils.

Le standard UWB sera préféré en ce qui concerne le débit binaire, la coexistence avec d'autres standards, la faible consommation d'énergie, la durée de vie des batteries et la géolocalisation. Le standard Zigbee quant à lui, sera préféré pour son faible coût et sa disponibilité sur plusieurs plateformes de développement. En effet la plupart des acteurs majeurs de l'industrie de la microélectronique offrent des puces intégrant le standard Zigbee, permettant ainsi un déploiement rapide du réseau.

REFERENCES ET NOTES

- AKYILDIZ F. and KASIMOGLU I.H. [2004]. Wireless Sensor and Actor Networks: Research Challenges. *Ad Hoc Networks*, 2 (4), pp 351–367.
- AKYILDIZ F., MELODIA T. and KAUSHIK R. [200]. A Survey on Wireless Multimedia Sensor Networks, *Computer Networks*, 51:921–960.
- ALEMDAR H. et ERSOY C. [2010]. Wireless sensor networks for healthcare: A survey, *Computer Networks*, 54(15): 2688–2710.
- ANASTASI G., CONTI M., FRANCESCO M. and PASSARELLA A. [2009]. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey, *Ad Hoc Networks*, 7(3): 537–568.
- BARONTI P., PILLEY P., CHOOK V.W.C., CHESSA S., GOTTA A. and FUN YU Y. [2007]. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards, *Computer Communications*, 30(7): 1655–1695.
- BOUALLEGUE M. [2016]. Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de Capteurs sans les réseaux et télécommunications. *Thèse de Doctorat, Université du Maine*. 100 p.
- BREANNE D. and MALAN D. [2004]. Low-Power, Secure Routing for MICA2 Mote, Tech. Rep. TR-06-04, Computer Science Group, Harvard University, MA, USA.
- CHALLAL Y. and BETTAHAR H. [2011]. Les Réseaux de capteurs. *Cours 1, Université de Technologie de Compiègne, France*. 31 p.
- CHANG E., POTDAR V. and SHARIF A. [2009]. Wireless Sensor Networks: A Survey, *International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Digital Ecosystems and Business Intelligence Institute, Curtin University of Technology, Perth, Western Australia*, pp. 636–641.
- CROSSBOW TECHNOLOGY INC [2007]. MICAz wireless measurement system, *Document Part Number: 6020-0060-04 Rev A*, <http://www.xbow.com>
- DEMENTYEV A., HODGES S., TAYLOR S., and SMITH J. [2013]. Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT SensorNodes in a Cyclic Sleep Scenario, *IEEE International Wireless Symposium, Beijing, China*.
- FOERSTER J. and LI Q. [2004]. UWB Channel Modeling Contribution from Intel, *IEEE P.802.15-02/279-SG3a*.
- GEZICI S., THIAN Z., BIANNAKIS G.B, KOBAYASHI H., MOLISCH A., POOR V., SAHINOGLU Z. [2005]. Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks, *IEEE Signal Processing Magazine* 22(4):70–84.
- HEILE B. [2006]. Wireless Sensor and Control Networks: Enabling New Opportunities with ZigBee. *ZigBee Alliance*, 53 p.
- JIN-SHYAN LEE, YU-WEI SU, ANDCHUNG-CHOU SHEN. [2007]. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi, *Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) Nov. 5-8, 2007, Taipei, Taiwan*.
- KARA A. [2004]. Développement d'une architecture de communications sans fil pour les réseaux des capteurs dans le domaine Aérospatiale. Micro et nanotechnologies/Micro-électronique. Université Paul Sabatier-Toulouse III, Français.
- KARAPISTOLI E. and PAVLIDOU F-N. [2010]. An Overview of the IEEE 802.15.4a Standard, *IEEE Communications Magazine*, 48(1).
- KE Y., RUNQUAN G., CUI XIA Z., MINHUI C., RUI QIANG L. AND JIAXIN W. [2009]. ZigBee-Based Wireless Sensor Networks, *International Forum on Information Technology and Applications*, 618–621.
- LIN S., LIU J. and FANG Y. [2007]. ZigBee Based Wireless Sensor Networks and Its Applications in Industrial, *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 1979–1983.
- MIHAJLOV B. et BOGDANOSKI M. [2009]. Overview and Analysis of the Performances of ZigBee-based Wireless Sensor Networks, *International Journal of Computer Applications*, 29(12): 28–35.
- MILENKOVIĆ A., OTTO A., JOVANOVIĆ E. [2006]. Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation,

Computer Communications, 29(13–14): 2521–2533.

OMOJOKUN G. [2015]. A Survey of ZigBee Wireless Sensor Network Technology: Topology, Applications and Challenges. Adekunle Ajasin University, Akungba-Akoko, Ondo-State, Nigeria.

OPPERMANN I., STOICA L., RABBACHIN A., SHELBY Z. and HAAPOLA J. [2004]. UWB wireless sensor networks: UWEN - a practical example, *IEEE Communications Magazine*, 42(12): S27-S32.

RAWAT P., SINGH K.D., CHAOUCHI H., BONNIN J. [2004]. Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies, *Journal of Supercomputing*, 68: 1-48.

SHAHIN FARAHANI [2008]. ZigBee Wireless Networks and Transceivers, Elsevier. Newnes Newton, MA, USA.

SOLDA S., CARUSO M., BEVILACQUA A., GEROSA A., VOGRIG D. and

NEVIANI A. [2011]. A5 Mb/s UWB-IR Transceiver Front-End for Wireless Sensor Networks, *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 46(7) : 1636-1647.

STANDARD ETSI EN 300 328 V 1.7.1 [2006-05].

STANDARD IEEE 802.15.4 [2015]. "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", standards.ieee.org.

STOICA L., RABBACHIN A., REPO H.O., TIURANIEMI T. S. and OPPERMANN I. [2005]. An Ultra wideband system architecture for tag based wireless sensor networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (5): 1632-1645.

WHEELER A. [2007]. Commercial Applications of Wireless Sensor Networks Using ZigBee, *IEEE Communications Magazine*, 45(4): 70-77.

ZHANG J., ORLIK P. V., SAHINOGLU Z., MOLISCH A. F. and KINNEY P. [2009]. UWB Systems for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the IEEE*, 97(2): 313-331.



This work is in open access, licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>