

# Les WPANs pour M2M/IoT : L'exemple ZIGBEE

EFORT

<http://www.efort.com>

En 2000, un sous-groupe du consortium HomeRF, se baptisant ZigBee coopère avec le groupe de travail 15 de l'IEEE 802 pour adresser le besoin d'un protocole sans fil de très courte portée (10-20m), économique et de très faible consommation, pour les environnements M2M résidentiels et aussi industriels tels que ceux liés à la domotique. Au mois de décembre de la même année, l'IEEE érige un nouveau groupe de travail, sur la décision de son comité de création de nouveaux standards, pour initier la définition d'un protocole sans-fil bas débit (LR-WPAN, Low Rate - Wireless Personal Area Network) appelé 802.15.4.

L'objectif de ce groupe a été de développer la couche physique (PHY) et la couche d'accès au médium (MAC) d'un standard se voulant simple, économique et peu gourmand en énergie. Le standard 802.15.4 sera ainsi définitivement ratifié par l'IEEE en mai 2003. Dans le même temps, l'alliance ZigBee, s'est focalisée sur le développement des couches réseau et application : La pile de protocole Zigbee dans un premier temps a été initialement définie en dehors de toute compatibilité avec les piles de protocole IP, et dans un second temps a évolué pour s'intégrer dans un monde tout IP et qui celui de l'Internet des objets.

Le but de ce tutoriel est de décrire les réseaux de communication nécessaires pour le monde du M2M (Machine to Machine) et de l'Internet des Objets (IoT, Internet of Things) en se focalisant sur les réseaux LR-WPAN dont fait partie Zigbee. Zigbee est défini ainsi que ces domaines d'application. La pile de protocole Zigbee est décrite ainsi que l'architecture de réseau associée (entités, topologie de réseau). Les couches réseau et application sont développées. Enfin l'évolution de Zigbee vers un monde tout IP est introduite.

## 1 Les réseaux de communication pour M2M/IoT

Les objets connectés qui communiquent leurs données peuvent le faire par trois types de solution :

- par une communication courte-portée, e.g., NFC (Near Field Communication) ou RFID (Radio Frequency Identification)
- via un Hub moyenne portée qui est lui-même connecté à internet. Les objets communiquent au Hub via les technologies telles que Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi HaLoW (802.11ah à venir), Zigbee, Z-wave. Cette solution est adaptée pour les objets dans la maison connectée (une box domotique ou internet pouvant alors faire office de Hub). C'est le cas par exemple avec la Homelive d'Orange tel que montré à la figure 1. Ce type de réseau est introduit dans ce tutoriel avec l'exemple de Zigbee.
- via un réseau longue portée. Dans le cas d'objets qui ont besoin de pouvoir communiquer sur une longue distance, il est nécessaire de s'appuyer sur un réseau qui permet une connexion en tout lieu couvert par les antennes. Les réseaux mobiles (2G, 3G, 4G) peuvent être utilisés, mais ils sont conçus pour de très hauts débits et consomment en contrepartie beaucoup d'énergie. Les objets connectés peuvent également s'appuyer sur des réseaux longue portée, qui ont la particularité de se baser sur une transmission basse fréquence, basse consommation d'énergie mais bas débit telle que Sigfox ou LoRa. Il s'agit des LP-WAN (Low Power Wide Area Network). Un précédent tutoriel a traité de ce type de réseau : [http://efort.com/r\\_tutoriels/LPWAN\\_EFORT.pdf](http://efort.com/r_tutoriels/LPWAN_EFORT.pdf)

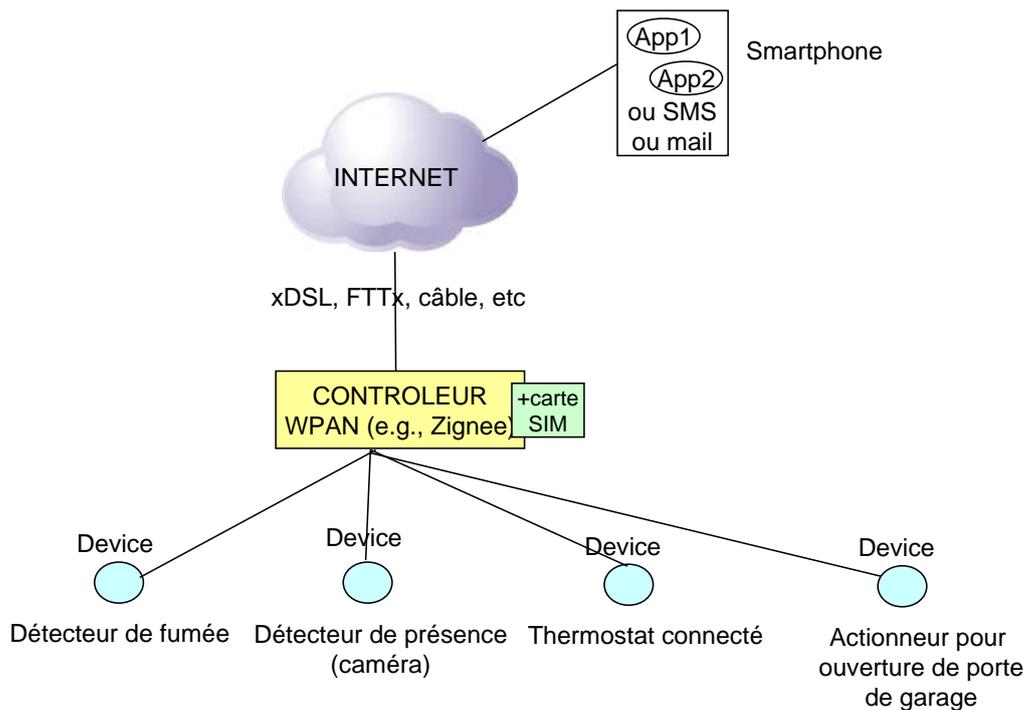


Figure 1 : Architecture pour une application M2M/IoT telle que la domotique en milieu résidentiel

## 2 Zigbee : Définition et domaines d'application

La pile de protocole ZigBee repose sur une solide fondation constituée par le standard IEEE 802.15.4 qui représente les couches basses physique et MAC (Medium Access Control). Utilisant une technologie simple de transmission par paquets, ce standard a été spécifiquement étudié pour minimiser la consommation en énergie globale du réseau, et permettre d'alimenter les noeuds par simples piles, si nécessaire.

Il garantit une certaine qualité de service, par l'emploi de mécanismes de réceptions et de codes de détection d'erreurs, par la modulation utilisée (étalement de spectre), et par la capacité de changer de fréquence s'il y a détection d'interférences nuisant aux communications.

Avec un total de 27 canaux de communications possibles, partagés sur 3 bandes de fréquences (868 MHz, 915 MHz et 2,4 GHz), le protocole ZigBee/802.15.4 s'affirme comme un standard de couverture mondiale.

Le temps de réveil d'un noeud ZigBee avant l'envoi d'une information est de l'ordre de 15 ms, assez rapide pour pouvoir satisfaire les besoins en termes de rapidité de transmission pour les applications de contrôle et de sécurité.

Les autres caractéristiques principales du protocole sont résumées dans le tableau ci-dessus.

- Débit maximum : 868 MHz : 20 kbits/s ; 915 MHz : 40 kbits/s ; 2,4 GHz : 250 kbits/s
- Portée radio : 10-20 m
- Temps de réveil : 15 ms (Bluetooth : 3s)
- Canaux : 868 MHz : 1 canal ; 915 MHz : 10 canaux ; 2,4 GHz : 16 canaux
- Bandes de fréquence : 2 couches physiques : 868 MHz/915 MHz et 2,4 GHz
- Adressage : Longues 64 bits (IEEE) ou raccourcies 16 bits
- Accès radio : CSMA-CA

- Température : Gamme industrielle, de - 40° C à + 85° C

Zigbee s'applique à différents domaines tels que :

- Domotique en milieu résidentiel : l'éclairage, les volets roulants, les systèmes d'alarme ou le contrôle du chauffage à l'intérieur du domicile par exemple, avec toutes les télécommandes associées. Outre la possibilité de faire interagir ces différentes fonctions à l'intérieur de la maison, le fait d'utiliser une technologie sans-fil telle que ZigBee permet de réduire les coûts d'installation, mais aussi de donner de la flexibilité permettant aux particuliers de modifier et de faire évoluer leurs installations.
- Domotique et contrôle de locaux professionnels : On retrouve dans les environnements de bureaux et de locaux professionnels les mêmes applications qu'en milieu résidentiel. Toutefois, les finalités peuvent varier, par exemple la gestion des thermostats pourra être dépendante de la demande en énergie d'un bâtiment afin de pouvoir lisser la consommation globale d'un site. À ces applications vient s'ajouter également par exemple la possibilité de faire du contrôle d'accès couplé à des systèmes d'alarme centralisés.
- Contrôle industriel : La plupart des domaines où ZigBee est implémenté en milieu industriel ont rapport à la surveillance, au contrôle et au relevé d'informations sur une chaîne de fabrication.
- Médical : Surveillance de patients, gestion d'équipements de mesures en milieu hospitalier.
- Informatique : Périphériques de contrôle tels souris, clavier, stylets, pavés tactiles, pointeurs de contrôle/commande. Par rapport à la traditionnelle technologie infrarouge, le profil ZigBee Input Device vise à donner plus de souplesse aux utilisateurs de ce genre d'interfaces homme/machine, notamment en terme de distance de travail et de consommation d'énergie. Le profil autorise également des communications bidirectionnelles pour des produits dotés de fonctionnalités plus étoffées que leurs homologues à liaison infrarouge et pouvant être mis à jour par téléchargement par l'interface air.

### 3 La pile de protocole Zigbee

La spécification d'un protocole complet de communication, qu'il soit filaire ou non, passe par l'établissement des règles qui régiront les transmissions entre chaque noeud du réseau. Ces règles sont contenues dans une pile logicielle qui sera implémentée dans chaque noeud du réseau.

Pour un protocole sans-fil, il est indispensable de définir à la base quelles seront les fréquences d'émission et de réception des signaux, avec quels débits seront envoyés les signaux et quel sera le type de modulation et de codage numérique des informations. Toutes ces spécifications sont contenues dans la couche physique (PHY ; Physical Layer) définie par l'IEEE qui se divise en deux parties suivant la bande de fréquences utilisée (868/915 MHz ou 2400 MHz).

Au-dessus de cette couche vient s'appuyer la couche d'accès au médium (MAC : Medium Access Control Layer), c'est la charnière centrale de la pile logicielle, qui définit et gère la façon dont un noeud ZigBee va « prendre la parole » dans le réseau et pouvoir émettre un message ou recevoir de l'information circulant sur celui-ci. Puis, lorsque les couches PHY et MAC sont fixées, il faut ensuite définir précisément les règles d'établissement d'un réseau, de l'association et de l'interconnexion des noeuds, ainsi que la structure détaillée des messages qui seront échangés (format des trames). Ces fonctions sont assurées par la couche de gestion du réseau (NWK, Network Layer).

Enfin la couche de plus haut niveau, appelée couche d'application, déterminera la façon dont sont utilisés tous les niveaux inférieurs pour une application donnée, notamment la signification des informations contenues dans une trame.

Un des rôles principaux de l'alliance ZigBee est de déterminer, pour chaque domaine d'application auquel ce protocole est destiné, une couche d'application commune à tous les fabricants qui proposeront des systèmes ZigBee dans un même domaine (e.g., sécurité, domotique, médical). Elle est la garante de l'interopérabilité entre les produits compatibles ZigBee commercialisés par des sociétés différentes.

Un amalgame est souvent réalisé entre standard ZigBee et standard IEEE 802.15.4, qui s'appliquent pourtant à des niveaux différents. La distinction est illustrée par la figure 2: 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 (NWK) et une couche Application.

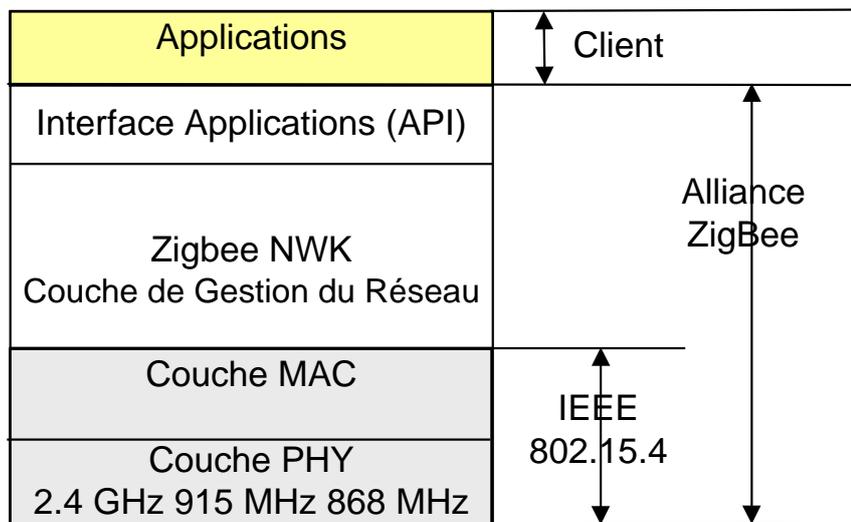


Figure 2 : La pile de protocole Zigbee

## 4 Entités de réseau Zigbee et topologies de réseau Zigbee

### 4.1 Entités Zigbee

La norme IEEE 802.15.4 sur laquelle s'appuie définit deux types d'entités réseau :

- les FFD (Full Function Device) implémentent la totalité de la spécification
- les RFD (Reduced Function Device) sont des entités allégées dans un objectif de moindre consommation énergétique et de moindre utilisation mémoire pour le microcontrôleur.

Parmi les FFD figurent :

- le **coordonateur** : c'est le chef d'orchestre du réseau sans qui rien ne serait possible sur le réseau. Comme dans un orchestre il ne peut y en avoir qu'un. Il connaît toutes les entités qui composent le réseau. Il est lui aussi une entité du réseau et a d'ailleurs la fonctionnalité de routage. Le coordinateur se doit d'être présent tout au long de la vie du réseau. Il est donc fortement conseillé d'alimenter en permanence ce module (prise de courant). Il est aussi possible de mettre le coordinateur sur onduleur (batterie de grande capacité avec recharge automatique).
- le **routeur** : c'est une entité plus intelligente qu'un simple end device, puisqu'elle est capable, en plus de gérer sa propre fonctionnalité, de transmettre un message reçu à

une autre entité, si cette dernière est, par exemple, trop éloignée pour être directement contactée par l'émetteur du message. Tout comme les entités de type « end-device », plusieurs routeurs peuvent être présents dans le réseau disposés généralement à des points clef de maillage, mais la présence d'un routeur n'est pas forcément nécessaire au fonctionnement du réseau.

- Toutefois les routeurs étendent la taille du réseau en permettant aux autres entités de s'enregistrer (aperrage) auprès d'eux et non exclusivement auprès du coordinateur. Cela évite de saturer le coordinateur en nombre d'entités inscrites. La taille maximum d'un réseau peut ainsi atteindre 65536 entités (une adresse réseau est définie sur deux octets). Les routeurs étendent par ailleurs la portée du réseau. Chaque entités routeur répète les signaux reçu aux autres entités qui lui sont enregistrées. Le signal se répercute ainsi d'entité en entité pour atteindre le End-device concerné. En cas d'indisponibilité d'un routeur toutes les entités enregistrées auprès de lui deviennent invisibles. Il est donc fortement conseillé de choisir une alimentation conséquente et continue.

L'entité RFD est le **end-device** : c'est un entité simple du réseau qui a sa propre fonctionnalité. Ce sont tous les modules terminaux comme les capteurs, actionneurs, etc. Ils ne sont actifs que sur changement de leurs états ou sur réponse à une trame, leurs consommation est donc très faible et ils peuvent tout à fait être alimentés par des piles ou des batteries.

## 4.2 Topologies de réseau Zigbee

Trois types de topologie sont possible pour un réseau Zigbee :

- Topologie en étoile: Dans la topologie en étoile, le réseau est contrôlé par seulement un dispositif appelé le Coordinateur ZigBee. C'est ce noeud coordinateur qui a en charge d'initialiser et de maintenir les autres dispositifs sur le réseau qui communiquent directement avec lui. Cette configuration est relativement simple. Tout message doit passer par le coordinateur, car il est celui qui les route à leur destination. Les end devices ne peuvent pas communiquer entre eux directement. Toute forme de réseau ZigBee doit consister au moins en un coordinateur ZigBee qui est la seule entité pouvant former le réseau initial.
- Topologie maillée : La topologie maillée emploie des routeurs en plus du coordinateur. Ces routeurs peuvent passer les messages à d'autres routeurs et aux end devices. Le coordinateur qui est une forme spéciale de routeur gère le réseau. Il peut aussi router les messages. Les end devices peuvent être attachés à tout routeur ou au coordinateur; Les end devices peuvent gérer et recevoir des informations, mais nécessitent leur parent afin de communiquer avec les autres nœuds. L'algorithme de routage suggéré par la ZigBee Alliance pour les réseaux maillés est AODV (Ad hoc On-Demand Vector Routing). Ce protocole de routage est peu gourmand en énergie et ne nécessite pas de grande puissance de calcul, il est donc facile à installer sur des petits équipements.
- Topologie en arbre : Dans la topologie en arbre, chaque routeur forme un sous-réseau ou les end devices lui sont rattachés. Les routeurs étant eux même rattachés au coordinateur ou à un routeur de plus haut niveau. Cette configuration n'est pas très différente de celle maillée.

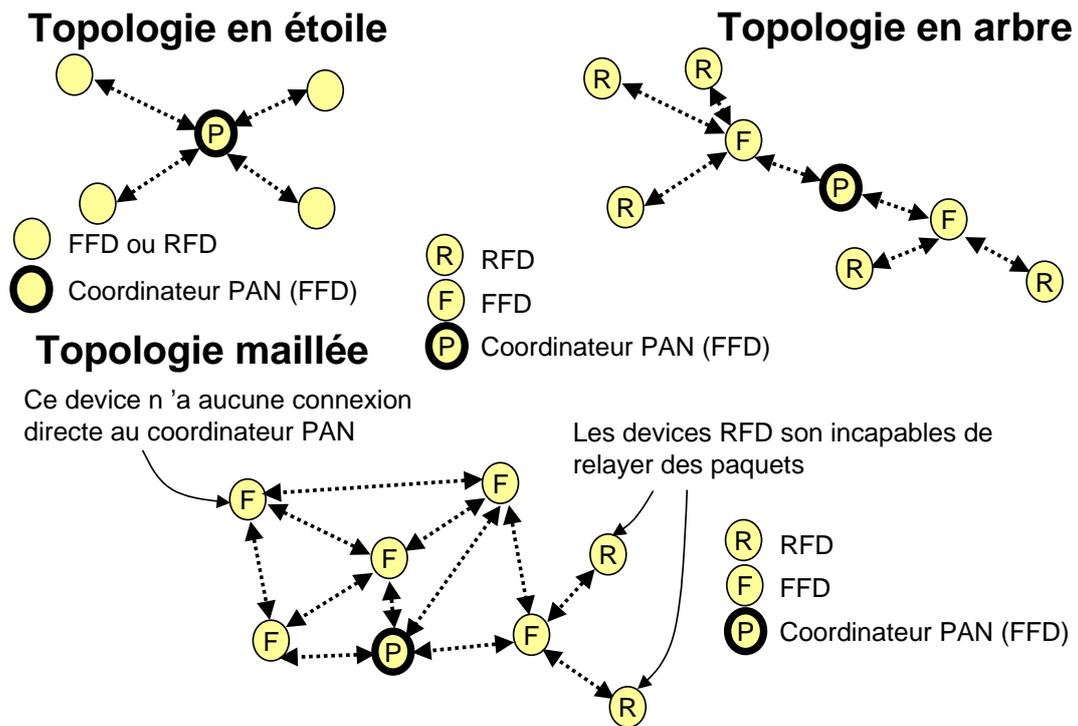


Figure 3 : Topologies de réseau Zigbee

## 5 Adressage réseau

Chaque device dans un réseau doit disposer d'une adresse unique IEEE 802.15.4 composée de 64 bits.

La couche Network (NWK) du protocole ZigBee affecte une adresse sur 16 bits en plus de l'adresse IEEE. Une table de correspondance simple permet de mapper chaque adresse IEEE de 64 bits en une adresse unique NWK de 16 bits. Les messages de la couche NWK nécessitent l'usage de l'adresse NWK.

L'adressage court permet la communication au sein d'un même réseau. La taille des messages est alors réduite et le besoin d'espace mémoire alloué pour stocker les adresses est minime. La combinaison d'un identificateur PAN unique et d'une adresse courte peut être utilisée pour la communication entre réseaux indépendants.

Le canal d'un réseau est sélectionné pendant l'étape de formation du réseau par le coordinateur ZigBee. Un réseau utilise normalement un canal fixe tout le temps. Il est possible de changer de canal en cas d'interférence radio importante.

Le protocole IEEE 802.15.4 offre une alternative quant au choix de la couche physique (PHY) pour permettre son utilisation dans un large éventail d'applications et de zones géographiques.

La différence fondamentale entre les deux couches physiques implantables réside dans la bande de fréquence utilisée pour les communications :

- La couche physique 2,4 GHz spécifie un fonctionnement dans la bande Industriel, Scientifique et Médical (ISM) située entre 2400 MHz et 2483,5 MHz. Cette bande de fréquence est disponible dans quasiment tous les pays du monde.
- La couche physique 868/915 MHz spécifie un fonctionnement dans la bande 868 MHz (bande ISM en Europe mais pas aux Etats-Unis) et 915 MHz (bande ISM aux Etats-Unis mais pas en Europe).

Bien que le besoin de mobilité d'un pays à un autre ne soit pas réel dans les applications ZigBee, la bande 2,4 GHz offre tout de même un avantage évident en terme de marché adressable et de minimisation des coûts de production (une seule référence produit pour une couverture commerciale mondiale).

Néanmoins, les bandes de fréquences 868 MHz et 915 MHz offrent une bonne solution pour éviter la congestion grandissante de la bande 2400 MHz, utilisée, entre autres, par les fours à micro-ondes, par Wi-Fi, par Bluetooth ou par les systèmes de transmission audio-vidéo locaux.

802.15.4 utilise (Figure 4):

- 16 canaux (250 kbit/s) dans la bande de fréquence de 2.4 à 2.4835 GHz,
- 10 canaux (40 kbit/s) dans la bande de fréquence de 902 à 928 MHz,
- 1 canal (20 kbit/s) dans la bande de fréquence de 868 à 868.6 MHz.

En pratique c'est la bande 2,4 GHz qui est utilisée par les équipements ZigBee du marché. Un réseau Zigbee doit utiliser un des 16 canaux de la bande de fréquence 2,4 GHz.

Tous les nœuds dans le même réseau doivent utiliser le même canal afin de communiquer physiquement. Cela signifie aussi que les réseaux peuvent être physiquement séparés et n'interféreront pas s'ils utilisent différents canaux.

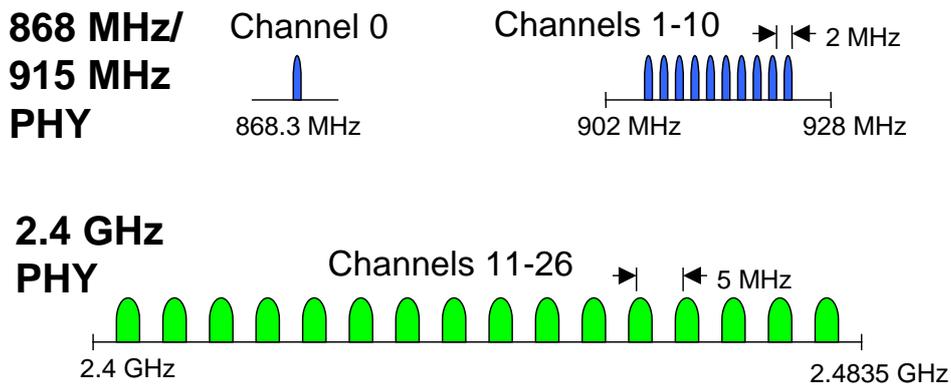


Figure 4 : Bandes de fréquence utilisées par Zigbee

Dans l'exemple de la figure 5, le premier réseau utilise le canal 11 de la bande de fréquence 2,4 GHz, alors que le second et le troisième réseau utilisent le canal 21 de la bande de fréquence 2,4 GHz. Le coordinateur est associé à l'adresse réseau 0. Dans le premier réseau, le coordinateur a assigné deux adresses réseau 1621 et 11FD (rappelons que l'adresse réseau est définie sur 2 octets). Dans le second réseau, son coordinateur a assigné l'adresse 11FD. Dans le troisième réseau, aucun device ne s'est enregistré pour l'instant.

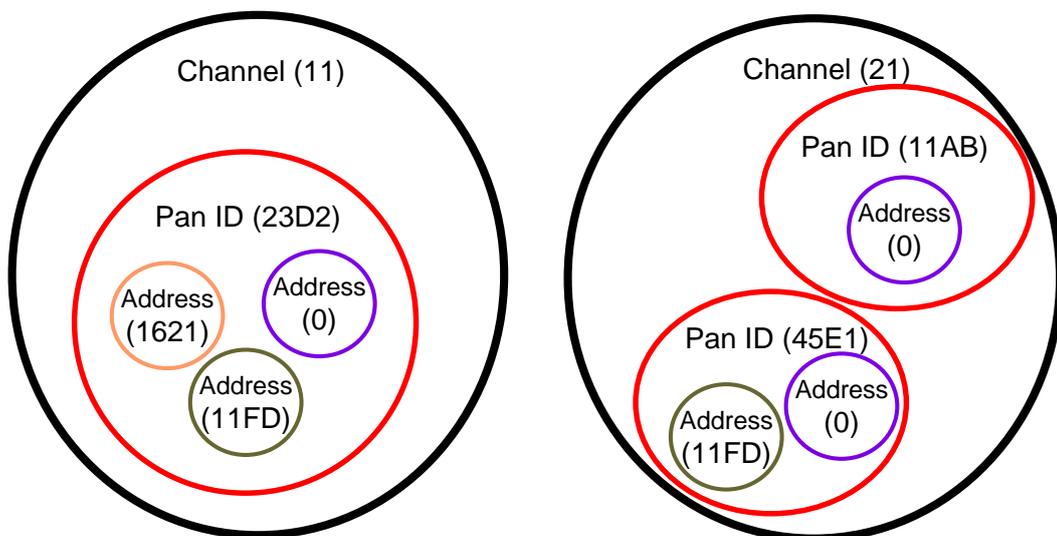


Figure 5 : Formation de réseau Zigbee

## 6 Couche d'application

### 6.1 Objet d'application

Le framework d'application de ZigBee est l'environnement dans lequel des objets d'application sont supportés par les devices Zigbee.

Un device ZigBee peut implémenter jusqu'à 240 objets d'applications avec la même adresse IEEE 802.15.4.

Un mécanisme de multiplexage est nécessaire pour identifier l'application source et destinataire d'un message. Cet identificateur de multiplexage est appelé endpoint dans la spécification ZigBee. On peut ramener ce concept de endpoint à celui de port dans un réseau TCP/IP.

Jusqu'à 240 objets d'application peuvent être définis, chacun identifié par un endpoint de 1 à 240. Endpoint 0 est réservé pour l'interface au profil du device et Endpoint 255 est utilisé pour diffuser des données à tous les objets d'application du device. Endpoints 241-254 sont réservés pour un usage futur.

### 6.2 Endpoint Zigbee

Chaque endpoint est caractérisé par un descripteur simple qui contient les informations suivantes : endpoint number, application profile ID, application device ID, application version ID, the list of input clusters and the list of output clusters.

Le descripteur d'un endpoint peut être obtenu par tout autre noeud en utilisant la commande ZDP appelée « simple descriptor request command ».

En plus du descripteur spécifique à chaque endpoint, les devices ZigBee disposent de descripteurs additionnels qui s'appliquent à l'ensemble du noeud.

- A node type descriptor: type de noeud et identité fournisseur
- A node power descriptor: caractéristiques de puissance du noeud (niveau de batterie)
- A complex descriptor (optionnel): informations supplémentaires sur le device tels que son numéro de série et le nom de modèle du device.
- A user descriptor: descripteur défini par l'utilisateur (16 caractères)

les Profils peuvent être découverts en utilisant la primitive ZigBee device profile request, adressée au endpoint 0 (ZDO) du device.

### 6.3 Profils Zigbee

L'Alliance ZigBee a défini plusieurs types de comportement afin de classer les objets. Ces types sont appelés profils. À ce jour, cinq profils ont été définis par l'Alliance :

- Le profil ZigBee Smart Energy décrit les fonctionnalités des objets intégrant la gestion de l'énergie (thermostat d'ambiance, relève de compteurs, consommation instantanée, ...)
- Le profil ZigBee and RF4CE décrit les fonctionnalités des télécommandes pour les appareils électroniques ;
- Le profil ZigBee Health Care décrit les fonctionnalités des objets touchant à la santé (cardiofréquencemètre, balance, pression sanguine, ...)
- Le profil ZigBee Building Automation décrit les fonctionnalités des objets entrant dans le contrôle des immeubles (détection d'événements et gestion de l'allumage/extinction des lumières, chauffage, climatisation) ;

- Le profil ZigBee Home Automation décrit les fonctionnalités des objets entrant dans le contrôle de la maison.
- Chaque profil liste précisément les types d'objets qu'il pourra couvrir et décrit les fonctionnalités obligatoires et optionnelles pour chacun de ces types.

## 7 Autre technologie LR-WPAN: Z-wave

Z-wave définit une pile de protocole pour des communications dans des domaines d'application similaires à ceux de Zigbee tels que la domotique.

La technologie Z-wave est non IP comme ZigBee et dispose de ses propres couches physique, MAC, réseau et application.

Le protocole radio Z-Wave est optimisé pour des échanges à faible bande passante et des appareils sur pile.

Les couches MAC et PHY sont décrites dans la recommandation ITU-T G.9959.

Z-wave fonctionne dans la gamme de fréquences 868 MHz en Europe et 908 MHz aux US. La portée est d'environ 50 m (d'avantage en extérieur, moins en intérieur). La technologie utilise la technologie du maillage (mesh) pour augmenter la portée et la fiabilité.

Chaque réseau Z-Wave est identifié par un Network ID, et chaque device est ensuite identifié par un Node ID. Le Network ID (aussi appelé Home ID) est l'identification commune de tous les nœuds appartenant à un réseau Z-Wave logique.

Le Network ID a une longueur de 4 octets (32 bits) et est assigné par le contrôleur primaire, lorsque le device est « inclus » dans le réseau. Le Node ID est l'adresse d'un nœud unique dans le réseau. Le Node ID a une longueur d'un octet (8 bits). Le nombre maximum de nœuds sur un réseau est 232. Le Node ID du contrôleur est 01.

L'alliance Z-Wave supporte et promeut cette technologie ( [www.z-wave.com](http://www.z-wave.com) ).

## 8 6LoWPAN

6LoWPAN est l'acronyme de IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks. C'est également le nom d'un groupe de travail de l'IETF. Le groupe 6LoWPAN a défini les mécanismes d'encapsulation et de compression d'entêtes permettant aux paquets IPv6 d'être envoyés ou reçus via le protocole de communication IEEE 802.15.4. IPv6 est efficace pour la livraison des données dans le contexte des réseaux locaux, des réseaux métropolitains et des réseaux étendus comme l'Internet. Cependant, ils est difficile à mettre en œuvre dans les capteurs en réseaux et autres systèmes contraints en raison, notamment, de la taille importante des en-têtes. 6LoWPAN permet à IPv6 d'intégrer ces matériels informatiques contraints et les réseaux qui les interconnectent, les LR-WPAN.

La figure 6 compare la pile de protocole IPv6 dans le contexte 6LoWPAN avec celle d'IPv6 typique et indique les cinq couches du modèle Internet.

Une pile de protocole IPv6 avec 6 LoWPAN aussi appelée pile de protocole 6LoWPAN is presque identique à la pile de protocole IPv6 typique à laquelle a été rajoutée une petite couche d'adaptation appelée couche adaptation LoWPAN. Cette dernière a été définie dans le RFC 4944 afin d'optimiser IPv6 sur IEEE 802.15.4.

Le protocole de transport le plus communément utilisé est UDP qui peut aussi être compressé en utilisant le format LoWPAN. Le protocole TCP n'est pas vraiment utilisé avec 6LoWPAN pour des raisons de performance, efficacité et complexité.

Le protocole Internet control message protocol v6 (ICMPv6) [RFC4443] est utilisé, par exemple les messages ICMP echo, ICMP destination unreachable et Neighbor Discovery. Les protocoles de la couche application sont souvent spécifiques à l'application et dans un format binaire. Cependant, un protocole d'application a été normalisé par l'IETF, à savoir CoAP (Constrained Application Protocol) fonctionnant justement sur UDP et qui a fait l'objet d'un tutoriel : [http://efort.com/r\\_tutoriels/COAP\\_EFORT.pdf](http://efort.com/r_tutoriels/COAP_EFORT.pdf). L'adaptation entre le format IPv6 et le format LoWPAN est réalisée par des routeurs à la périphérie d'îlots 6LoWPAN, définis comme des 'edge router'.

Cette traduction est transparente, efficace et sans état (stateless) dans les deux sens. L'adaptation LoWPAN dans un edge router est typiquement réalisée par le driver d'interface réseau 6LoWPAN qui est transparent pour la pile de protocole IPv6.

La figure 6 montre une architecture de edge router supportant 6LoWPAN.

Dans le LoWPAN, les hosts et les routeurs ne fonctionnent pas avec les formats d'en-têtes IPv6 ou UDP puisque tous les champs compressés sont connus implicitement par chaque nœud.

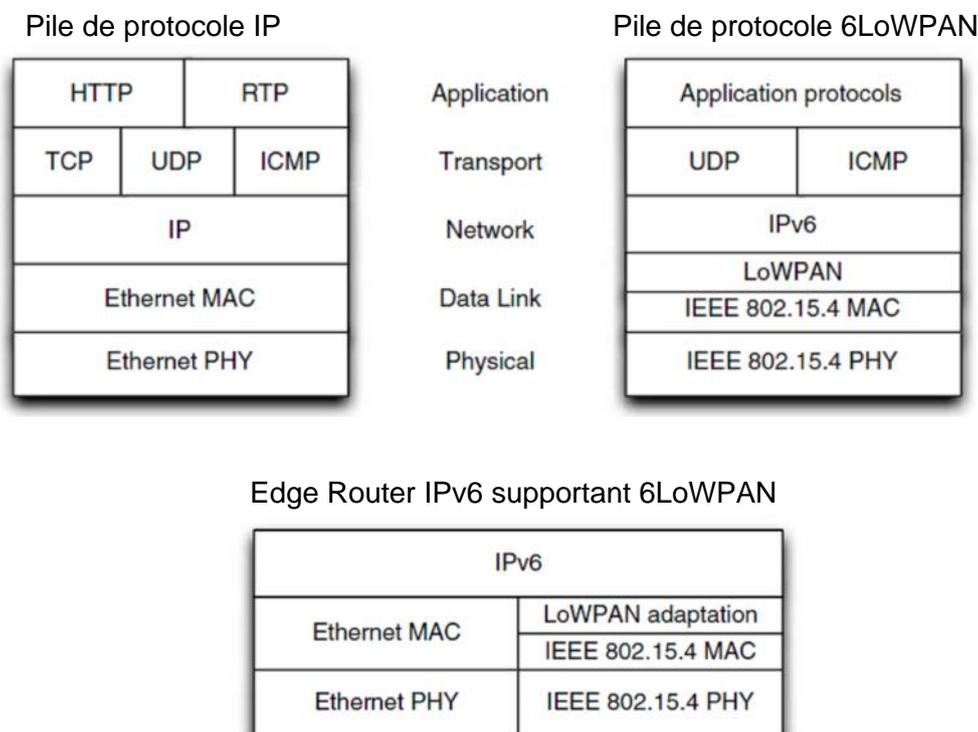


Figure 6 : Pile de protocole IPv6 dans le contexte 6LoWPAN

Tout ce bel édifice intéresse aujourd'hui des standards qui s'étaient construits initialement en dehors de toute compatibilité avec les piles de protocole IP. C'est le cas notamment de ZigBee qui s'est converti aux bienfaits du tout IP en mars 2013 avec la publication de la spécification ZigBee IP, présentée comme le premier standard ouvert dédié aux réseaux maillés sans fil courte portée compatibles IPv6 et permettant la connexion sans couture de dispositifs basse consommation et bas coût à Internet. Censée constituer une brique importante de l'Internet des objets, la pile protocolaire ZigBee IP enrichit les couches PHY et MAC IEEE 802.15.4 de couches réseau, sécurité et application conformes aux recommandations de l'IETF. Elle s'appuie en particulier sur les standards IPv6, 6LoWPAN, et définit des profils d'applications tels que Zigbee Smart Energy Profile 2.0 (SEP).

La formation EFORT « M2M et Internet des Objets: Vision Réseau et Service » fournit toutes les clés de compréhension de l'écosystème M2M/IoT en terme de domaines d'application, architectures de réseau et de services associées, de protocoles utilisés et d'évolutions à venir.

[http://www.efort.com/index.php?PageID=21&l=fr&f\\_id=169&imageField.x=5&imageField.y=7](http://www.efort.com/index.php?PageID=21&l=fr&f_id=169&imageField.x=5&imageField.y=7)