

M2 RST + Syst.

Ris. Sans Fil & Mobiles

22

Chap 1: Rappels & Intro.

1/ 2: WPANs

## Les réseaux personnels Bluetooth, UWB et ZigBee

1/ 3: WLANs

1/ 4: WMANs

Les réseaux personnels se préoccupent des équipements qui se trouvent dans les poches et les cartables pour les relier entre eux avec des débits suffisants pour y faire transiter de la voix, des données et de la vidéo.

La portée de ces réseaux est faible, de l'ordre de quelques mètres. Bluetooth a longtemps été la seule solution, mais elle est aujourd'hui concurrencée par de nombreuses propositions et produits provenant de normes édictées par le groupe de travail IEEE 802.15 de l'IEEE.

### WPAN et IEEE 802.15

Le groupe IEEE 802.15 a été mis en place en mars 1999 dans le but de réfléchir aux réseaux hertziens d'une portée d'une dizaine de mètres, ou WPAN (Wireless Personal Area Network), avec pour objectif de réaliser des connexions entre les différents portables d'un même utilisateur ou de plusieurs utilisateurs. Ce type de réseau peut interconnecter un PC portable, un téléphone portable, un PDA ou tout autre terminal de ce type. Trois groupes de services ont été définis, A, B et C.

Le groupe A utilise la bande du spectre sans licence d'utilisation (2,4 GHz) en visant un faible coût de mise en place et d'utilisation. La taille de la cellule autour du point d'émission est de l'ordre du mètre. La consommation électrique doit être particulièrement faible pour permettre au terminal de tenir plusieurs mois sans recharge électrique. Le mode de transmission choisi est sans connexion. Le réseau doit pouvoir travailler en parallèle d'un réseau IEEE 802.11. Sur un même emplacement physique, il peut donc y avoir en même temps un réseau de chaque type, les deux pouvant fonctionner éventuellement de façon dégradée.

Le groupe B affiche des performances en augmentation, avec un niveau MAC pouvant atteindre un débit d'au moins 100 Mbit/s. Le réseau de base doit pouvoir interconnecter au moins seize machines et proposer un algorithme de QoS, ou qualité de service, pour autoriser le fonctionnement de certaines applications, comme la parole téléphonique, qui



demande une qualité de service assez stricte. La portée entre l'émetteur et le récepteur atteint une dizaine de mètres, et le temps maximal pour se raccorder au réseau ne doit pas dépasser la seconde. Enfin, cette catégorie de réseau doit posséder des passerelles avec les autres catégories de réseaux 802.15.

Le groupe C introduit de nouvelles fonctionnalités importantes pour particuliers ou entreprises, comme la sécurité de la communication, la transmission de la vidéo et la possibilité de roaming, ou itinérance, entre réseaux hertziens.

Pour répondre à ces objectifs, des groupements industriels se sont mis en place, comme Bluetooth ou la WiMedia Alliance. Bluetooth regroupe plus de 800 sociétés qui ont réalisé une spécification ouverte de connexion sans fil entre équipements personnels. Bluetooth est fondé sur une liaison radio entre deux équipements, tandis que la WiMedia Alliance s'intéresse aux connexions à très haut débit sur une courte portée.

Le groupe de travail IEEE 802.15 s'est scindé en quatre sous-groupes :

- IEEE 802.15.1, pour les réseaux de catégorie C ;
- IEEE 802.15.3 pour les réseaux de catégorie B ;
- IEEE 802.15.4 pour les réseaux de catégorie A ;
- IEEE 802.15.2 pour s'occuper des problèmes d'interférences avec les autres réseaux utilisant la bande des 2,4 GHz.

Le groupe IEEE 802.15 a créé de nouveaux groupes, notamment le TG3c (Task Group 3c), pour étudier les possibilités d'un réseau personnel dans les gammes 57 à 64 GHz non utilisées, ce qui permettrait de monter à des vitesses de transmission de plusieurs gigabits par seconde, et le TC5, qui a pour objectif les réseaux mesh, susceptibles de couvrir une surface géographique bien plus importante qu'un réseau personnel.

Le choix du premier groupe s'est tourné vers Bluetooth, présenté en détail à la section suivante. Le deuxième groupe est orienté vers le haut débit et l'UWB (Ultra Wide Band). Cette interface radio a été récupérée par la WiMedia Alliance et par le groupe SIG (Bluetooth Special Interest Group). Le groupe 802.15.4 définit un réseau à faible portée, de l'ordre de quelques mètres, pour interconnecter tous les capteurs et actionneurs que l'on peut trouver un peu partout, dans les jouets par exemple.

## Bluetooth

Le Bluetooth Special Interest Group, constitué au départ par Ericsson, IBM, Intel, Nokia et Toshiba et rejoint par plus de 2 500 sociétés, définit les spécifications de Bluetooth.

C'est une technologie peu onéreuse, grâce à sa forte intégration sur une puce unique de 9 mm sur 9 mm. Les fréquences utilisées sont comprises entre 2 400 et 2 483,5 MHz. On retrouve la même gamme de fréquences dans la plupart des réseaux sans fil utilisés dans un environnement privé, que ce dernier soit personnel ou d'entreprise. Cette bande ne demande pas de licence d'exploitation.

## Schémas de connexion

Plusieurs schémas de connexion ont été définis par les normalisateurs. Le premier d'entre eux correspond à un réseau unique, appelé piconet, qui peut prendre en charge jusqu'à huit terminaux, avec un maître et huit esclaves. Le terminal maître gère les communications



avec les différents esclaves. La communication entre deux terminaux esclaves transite obligatoirement par le terminal maître. Dans un même piconet, tous les terminaux utilisent la même séquence de saut de fréquence.

Un autre schéma de communication consiste à interconnecter des piconets pour former un scatternet, d'après le mot anglais *scatter*, dispersion. Comme les communications se font toujours sous la forme maître-esclave, le maître d'un piconet peut devenir l'esclave du maître d'un autre piconet. De son côté, un esclave peut être l'esclave de plusieurs maîtres. Un esclave peut se détacher provisoirement d'un maître pour se raccrocher à un autre piconet puis revenir vers le premier maître, une fois sa communication terminée avec le second.

La figure 22.1 illustre des connexions de terminaux Bluetooth dans lesquelles un maître d'un piconet est esclave d'un autre piconet et un esclave est esclave de deux maîtres. Globalement, trois piconets sont interconnectés par un maître pour former un scatternet.

Figure 22.1  
Schéma de connexion  
de terminaux Bluetooth



La communication à l'intérieur d'un piconet peut atteindre près de 1 Mbit/s. Comme il peut y avoir jusqu'à huit terminaux, la vitesse effective diminue rapidement en fonction du nombre de terminaux connectés dans une même picocellule. Un maître peut cependant accélérer sa communication en travaillant avec deux esclaves en utilisant des fréquences différentes.

### Les communications

La communication sur une liaison Bluetooth entre deux machines peut atteindre un débit de 433,9 Kbit/s dans une communication bidirectionnelle (full-duplex). Les débits sont égaux à 723,2 Kbit/s dans un sens et 57,6 Kbit/s dans l'autre en cas de communication déséquilibrée.

Les communications peuvent être de deux types : asynchrone ou synchrone. Une communication synchrone, ou SCO (Synchronous Connection-Oriented link), permet un débit synchrone de 64 Kbit/s. Ce type de connexion autorise le passage de la parole téléphonique avec une garantie de service. Une communication asynchrone, ou ACL (Asynchronous Connectionless Link), permet des trafics asynchrones avec plus ou moins de protection. Le débit peut atteindre 723,2 Kbit/s.

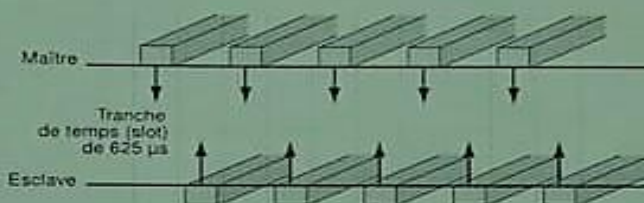


Plusieurs catégories de communications peuvent être définies sur une connexion Bluetooth : une seule communication asynchrone, trois communications simultanées en SCO ou une SCO avec une ACL symétrique de 433,9 Kbit/s. Cela donne un débit total de la liaison de presque 1 Mbit/s dans le dernier cas. Un terminal esclave ne peut prendre en charge, au maximum, que deux canaux SCO provenant de deux terminaux distincts.

De façon plus précise, le temps est découpé en tranches, ou slots, à raison de 1 600 slots par seconde. Un slot fait donc 625  $\mu$ s de long, comme illustré à la figure 22.2. Un terminal utilise une fréquence sur un slot puis, par un saut de fréquence (Frequency Hop), il change de fréquence sur la tranche de temps suivante, et ainsi de suite.

Figure 22.2

Découpage en slots



Un client Bluetooth utilise de façon cyclique toutes les bandes de fréquences. Les clients d'un même piconet possèdent la même suite de sauts de fréquence, et, lorsqu'un nouveau terminal veut se connecter, il doit commencer par reconnaître l'ensemble des sauts de fréquence pour pouvoir les respecter. Une communication s'exerce par paquet. En règle générale, un paquet tient sur un slot, mais il peut s'étendre sur trois ou cinq slots (voir figure 22.3). Le saut de fréquence a lieu à la fin de la communication d'un paquet.

Figure 22.3

Transmission sur plusieurs slots



## Fonctionnement de Bluetooth

Comme indiqué précédemment, Bluetooth permet la réalisation de petits réseaux personnels de quelques mètres carrés, les piconets. Les terminaux se connectent entre eux par l'intermédiaire d'un maître. La puissance de transmission peut atteindre 100 mW (milliwatt), ce qui permet une émission sur plusieurs dizaines de mètres. Il est possible de réduire cette puissance à 2,5 et 1 mW pour atteindre une portée de quelques mètres.

À une puissance de 100 mW, une batterie peut tenir assez longtemps, à condition d'utiliser des options d'économie d'énergie. Pour cette raison, des états de basse consommation ont été introduits dans la norme Bluetooth, qui autorisent une autonomie de plusieurs jours.







## Techniques d'accès

Bluetooth met en œuvre une technique temporelle synchronisée dans laquelle le temps est divisé en tranches de longueur égale, appelées *slots*. Un slot correspond au temps élémentaire de transmission d'un paquet. Un paquet peut demander un temps de transmission plus ou moins long, qui ne peut pas excéder cinq slots.

Le format standard d'un paquet Bluetooth est illustré à la figure 22.5.

Figure 22.5

Format d'un paquet Bluetooth



Les 72 premiers bits du paquet permettent de transporter le code d'accès tout en effectuant une synchronisation entre les composants Bluetooth. Cette zone se compose de 4 bits, de préambule 0101 ou 1010, permettant de détecter le début de la trame, puis de 64 ou 68 bits pour le code et enfin de 4 bits de terminaison. Lorsque le corps fait 64 bits — permettant de détecter la fin de la synchronisation en utilisant les séries 0101 ou 1010. Les 54 bits suivants consistent en trois fois une même séquence de six champs de longueur 3, 4, 1, 1, 1 et 8 bits. Ces champs servent à indiquer l'adresse d'un membre actif du réseau, ainsi qu'un numéro de code, un contrôle de flux piconet, une demande d'acquiescement et un contrôle d'erreur des transmissions. Le champ de 18 bits est répété trois fois de suite pour s'assurer de sa réception correcte au récepteur. La zone de données qui s'étend ensuite de 0 à 2745 bits contient une zone de détection d'erreur sur un ou deux octets.

Trois grands types de paquets sont définis dans Bluetooth, les paquets de contrôle, les paquets SCO et les paquets ACL. Les paquets de contrôle permettent de gérer les connexions des terminaux Bluetooth entre eux. Les paquets SCO correspondent aux communications synchrones de type SCO, et les paquets ACL aux transferts de données asynchrones.

Dans chacun de ces types de paquets, plusieurs sous-catégories peuvent être distinguées :

- Les paquets DV (Data-Voice), qui portent à la fois des données et de la parole.
- Les paquets DMx (Data-Medium) pour les paquets ACL en mode asynchrone avec un encodage permettant la correction des erreurs en ligne. La valeur *x*, qui vaut 1, 3 ou 5, indique la longueur du paquet en nombre de slots.
- Les paquets DHx (Data-High) pour les paquets ACL en mode asynchrone mais sans correction d'erreur, permettant ainsi un débit effectif plus élevé. De même que précédemment, *x* indique la longueur du paquet.

- Ad. Mac (34) : @ 4's. Esc. de 4 bits.

- Type (44) : N° de code.

- FLT (1 bit) : état de flux.

- ARQN (1 bit) : Demande d'acquiescement.

- SEQN (1 bit) : N° de séquence.

- HEC (8 bits) : état de la transmission.



- Les paquets HVy (High-quality-Voice) pour les paquets SCO en mode synchrone sans correction d'erreur. La valeur y indique le type de contrôle d'erreur dans le paquet. Si  $y = 1$ , un FEC (Forward Error Correction) de 1/3 est utilisé. Dans ce cas, le corps du paquet contient une redondance par l'émission de trois fois la même information. Si  $y = 2$ , un FEC de 2/3 est utilisé. Dans ce cas, on transforme à l'aide d'un code la suite d'éléments binaires à transmettre de façon à détecter et corriger les erreurs. Si  $y = 3$ , aucune protection n'est utilisée.

### Sécurité et fonctions de gestion

Trois niveaux de sécurité ont été définis dans Bluetooth. Le premier niveau n'a pas de gestion de sécurité. Le deuxième niveau instaure une sécurité à l'échelon applicatif en introduisant un processus d'identification lors de l'accès au service. Le troisième niveau introduit une sécurité plus importante en travaillant sur la liaison Bluetooth. Un processus d'authentification est mis en place, qui peut être suivi par un chiffrement à l'aide de clés privées pouvant atteindre 64 bits — la norme cite 128 bits comme future extension.

La sécurité est un élément important dans les systèmes de liaison radio puisque l'émission est diffusée et peut potentiellement être captée par les récepteurs environnants. Dans Bluetooth, deux équipements, par exemple deux PDA situés dans les poches de deux utilisateurs du métro, pourraient très bien entrer en communication par hasard. Pour éviter cela, Bluetooth offre des mécanismes d'authentification et de chiffrement au niveau MAC.

La principale technique d'authentification provient d'un programme automatique mis en place dans les terminaux Bluetooth, qui permet l'authentification et le chiffrement par une génération de clés par session. Chaque connexion peut utiliser ou non le mécanisme de chiffrement dans un sens seulement ou dans les deux sens simultanément. Seules des clés de 40 ou 64 bits peuvent être utilisées, ce qui confère une sécurité relativement faible, quoique suffisante pour le type de communication transitant entre deux terminaux Bluetooth. Si une sécurité supplémentaire doit être obtenue, il est nécessaire d'utiliser un chiffrement au niveau de l'application.

L'algorithme de sécurité utilise le numéro d'identité du terminal, ainsi qu'une clé privée et un générateur aléatoire interne à la puce Bluetooth. Pour chaque transaction, un nouveau numéro aléatoire est tiré pour chiffrer les données à transmettre. La gestion des clés est prise en charge par l'utilisateur sur les terminaux qui doivent s'interconnecter.

En utilisant le même procédé pour réaliser le chiffrement dans un scatternet, il est nécessaire de procéder, au début de la mise en relation, à un échange de clés privées entre les possesseurs de piconets indépendants.

Dans un piconet, un système de gestion est nécessaire pour réaliser les fonctions classiques de mise en œuvre des communications. Le processus de gestion des liaisons prend en charge les procédures classiques d'identification ainsi que la négociation des paramètres d'authentification. Il prend également à sa charge la configuration de la liaison, c'est-à-dire la définition des paramètres de fonctionnement. Ce processus de gestion s'effectue par un échange de requêtes-réponses entre les deux extrémités de la liaison.

$$APIP: \left[ N^{\circ} I + Priv. Key + R2nd \right] \in Puce$$

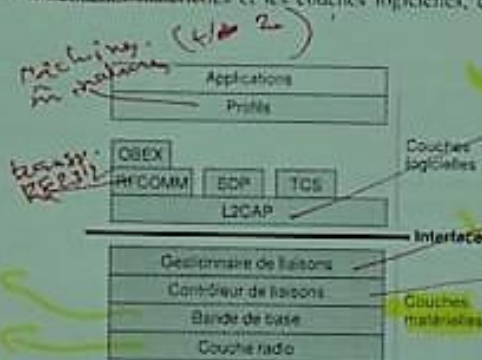
Chiff. des transact.



## L'architecture Bluetooth

L'objectif de l'architecture Bluetooth est de permettre l'interconnexion de tout type de terminal qui possède l'interface radio Bluetooth. Cette architecture est composée de deux grands types de couches : les couches matérielles et les couches logicielles, comme l'illustre la figure 22.6.

Figure 22.6  
L'architecture Bluetooth



Les couches basses correspondent à la partie transmission sur l'interface radio, que nous avons examinée aux sections précédentes. La distance entre l'émetteur et le récepteur dépend de la puissance d'émission. Trois classes ont été définies : la classe 1 correspond à une puissance de 100 mW et à une portée d'une centaine de mètres, la classe 2, de 2,5 mW et d'une portée d'une quinzaine de mètres, et la classe 3, la plus classique, de 1 mW et d'une portée d'un mètre. Les adresses sont gérées au niveau de la bande de base et sont gérées par l'IEEE sur une longueur de 48 bits.

Le contrôleur de liaison a pour objectif de gérer la configuration de la liaison. Le gestionnaire de liaison vise la sécurité en gérant l'authentification et le chiffrement.

La couche L2CAP (Logical Link Control & Adaptation Protocol) permet de multiplexer les flots qui proviennent des différents protocoles de niveau supérieur. Les protocoles situés au-dessus correspondent à des services de transport sur l'interface série RS-232 (RFCOMM), à la découverte de service avec SDP (Service Discovery Protocol) et au protocole d'échange d'objets OBEX (Object Exchange). Au-dessus de cette couche, des profils d'équipements ont été choisis pour permettre de mettre en place une relation simple entre terminaux de même nature (une vingtaine de profils ont été définis).

## Les nouvelles versions de Bluetooth

Une version Bluetooth 2.0 a été définie en 2004, qui permet de multiplier par trois le débit de la première génération et d'atteindre des pointes à 2,1 Mbit/s.

Globalement, il n'y a pas de modification majeure. La version 2.1 EDR (Enhance Data Rate) réduit la complexité des composants et permet de ce fait de diviser la consommation électrique par cinq.

La vraie révolution de Bluetooth arrive avec la version 3.0 ou Next-Gen Bluetooth ou encore Bluetooth UWB. La partie haute de l'architecture n'est pas modifiée, mais la couche matérielle est remplacée par l'UWB (Ultra Wide Band). Cette nouvelle interface permet d'atteindre un débit de 480 Mbit/s.



## Les réseaux UWB

Le groupe de normalisation MBOA (MultiBand OFDM Alliance) a défini les éléments de base pour la réalisation d'une vision complète d'un écosystème qui offrirait aux consommateurs un large éventail de produits pour la gestion et le contrôle des réseaux de domicile.

La couche radio UWB (Ultra Wide Band) et la plate-forme de convergence forment ensemble le mécanisme fondamental de transport pour différentes applications, y compris l'IEEE 1394 (FireWire), et le nouveau cadre provenant du consortium DLNA (Digital Living Network Alliance).

L'alliance OFDM multibande (MBOA), établie en 2003 et formalisée dans un groupe d'intérêt (SIG) en 2004, a été établie pour favoriser la production d'une norme globale pour les solutions sans fil de l'UWB. Ses 200 membres comprenaient des industriels des semi-conducteurs, du calcul scientifique, de l'électronique grand public et des dispositifs mobiles.

Les caractéristiques de MBOA pour la couche physique (PHY) et le contrôleur d'accès de médias (MAC) sont finalisées et disponibles pour les sociétés membres de l'alliance. Cette dernière s'est fondue dans une autre alliance plus importante, la WiMedia Alliance en mars 2005.

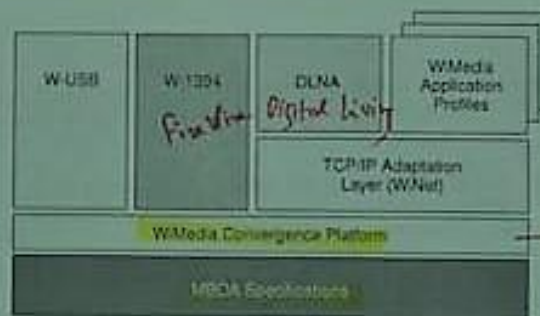
### WiMedia Alliance

La WiMedia Alliance est un groupement d'industriels ayant tout poussé au développement du concept UWB, notamment de couches protocolaires de niveau logiciel.

L'alliance WiMedia vise à favoriser la connectivité et l'interopérabilité des produits UWB. La plate-forme commune illustrée à la figure 22.7 permettra à de multiples applications de fonctionner ensemble sur une interface radio commune.

Figure 22.7

Plate-forme  
de la WiMedia Alliance



La combinaison de l'interface radio proposée utilisant l'OFDM multibande et de l'architecture de la plate-forme WiMedia permet de réaliser la convergence pour l'exécution des versions sans fil provenant de l'UWB : WUSB, IEEE 1394, WiNet, Bluetooth 3.0 et DLNA.



WiMedia a également défini plusieurs spécifications qui devraient faciliter l'arrivée de nouveaux produits :

- WNEP (WiMedia Network Encapsulation Protocol), qui permettra de prendre en charge l'environnement TCP/IP.
- WiMCA (WiMedia Alliance's Convergence Architecture), qui définit l'architecture de la plate-forme de convergence de WiMedia. Cette architecture est interopérable par plusieurs fournisseurs pour n'importe quel protocole d'application. La plate-forme établit des politiques équitables pour toutes les entités accédant par le canal radio UWB. Des processus ont en outre été mis en place pour assurer la sécurité et la qualité de service.
- SMP (Streaming Media Profile), qui définit les protocoles et les formats pour le streaming en utilisant des primitives provenant d'UPnP (voir le chapitre 28).
- DIP (Digital Imaging & Printing Profile), qui propose un protocole et des formats d'application pour UPnP permettant de réaliser des applications d'imagerie numérique et d'impression.

#### WUSB et FireWire

Le groupe WUSB a été constitué en 2004 par sept leaders de l'industrie : Agere Systems, HP, Intel, Microsoft Corporation, NEC, Philips et Samsung.

Ce groupe a rapidement proposé une charte définissant les spécifications du WUSB, avec une largeur de bande de 480 Mbit/s. Le WUSB a pour objectif de remplacer les câbles USB2. Cette interface sera de plus en plus disponible en natif sur les cartes mères. En particulier, Intel devrait à terme doter toutes ses cartes mères de l'interface WUSB.

Un deuxième groupe, l'association 1394 Trade, a développé une spécification pour l'utilisation de la technique UWB pour les interfaces IEEE 1394 FireWire à un débit de 400 Mbit/s.

#### L'interface radio

Les origines de la technologie UWB remontent au travail commencé en 1962 sous les noms d'impulsion radio de bande de base ou de communications sur des porteuses libres.

Le sigle Ultra-Wide Band a été proposé pour la première fois par le département de la Défense aux États-Unis en 1989. Aujourd'hui, l'UWB définit, selon la FCC, n'importe quelle technologie radio s'étalant sur une partie du spectre occupant plus de 20 % de la fréquence centrale ou au minimum 500 MHz.

Identifiant les avantages des nouveaux produits qui pourraient incorporer cette technologie pour bénéficier des applications publiques de sûreté, d'entreprise et de consommation d'énergie restreinte, la FCC lui a alloué en 2002 une partie du spectre radio utilisable sans licence allant de 3,1 à 10,6 GHz. Une partie additionnelle du spectre est disponible pour les applications médicales, scientifiques et de secours incendie.



Plutôt que d'exiger une interface UWB utilisant l'ensemble de la bande passante disponible, représentant 7,5 GHz, pour transmettre les signaux d'information, la FCC a défini une largeur de bande minimale de 500 MHz à 100M. Cette largeur de bande minimale, ainsi que d'autres conditions imposées par la FCC, protège la transmission des autres signaux provenant d'utilisateurs de cette partie du spectre. En effet, si la solution d'émettre en dessous du bruit permet de ne pas perturber les autres utilisateurs de cette bande, en revanche ces autres utilisateurs pourraient perturber l'UWB. Par exemple, une connexion UWB dans un aéroport serait perturbée par les radars et autres équipements utilisant la bande UWB.

Il a été montré par de nombreuses expériences qu'une bande de 500 MHz était toujours disponible, même dans les environnements les plus perturbés. Cependant, cette flexibilité permise par le standard de la FCC augmente considérablement les options disponibles pour la conception des systèmes de communication UWB. Les concepteurs sont libres d'employer une combinaison de sous-bandes du spectre pour optimiser le fonctionnement du système, de la puissance nécessaire et de la complexité de conception.

Il est à noter que la puissance permise est inférieure en Europe dans la réglementation édictée par l'ETSI.

Les systèmes UWB peuvent maintenir un même niveau de puissance, comme s'ils employaient toute la largeur de bande, en intercalant des symboles dans les différentes sous-bandes. Dans un système multibande, l'information peut être transmise par la méthode fondée sur les impulsions traditionnelles sur la porteuse de base ou par des techniques plus avancées de multiporteuse.

Les systèmes fondés sur les impulsions sur la porteuse de base transmettent les signaux en modulant la phase d'impulsion. Cette solution provient d'une technologie éprouvée, qui s'appuie sur une conception simple de l'émetteur. Cela ne va toutefois pas sans inconvénients. Il est difficile de rassembler suffisamment d'énergie pour émettre le signal dans un environnement typique d'utilisation, avec beaucoup de surfaces réfléchissantes, en n'employant qu'une chaîne RF simple. Les limitations des temps de commutation peuvent être très strictes, à l'émetteur comme au récepteur.

La technique MB-OFDM (Multi-bandes OFDM) transmet les portegages multiples simultanément de façon espacée sur des fréquences précises. L'utilisation d'algorithmes rapides de transformée de Fourier garantit une grande efficacité énergétique dans les cas de trajets multiples, tout en n'augmentant que légèrement la complexité de l'émetteur. Les bénéfices de cette solution MB-OFDM incluent la flexibilité et la forte élasticité spectrales ainsi qu'une forte résistance aux interférences radio et aux effets provenant des trajets multiples.

Les techniques de modulation OFDM ont été appliquées avec succès à de nombreux systèmes de communication commercialisés aux performances élevées, notamment Wi-Fi 802.11a/g, WiMAX 802.16a, HomePlug et les normes ADSL.

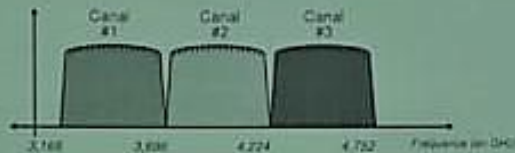
Fondée sur la technologie CMOS, l'utilisation du spectre de 3,1 à 4,8 GHz est considérée comme optimale pour des déploiements initiaux. La limite supérieure permet d'éviter des interférences avec la bande U-NII, où est localisée l'interface radio 802.11a, et de simplifier la conception des circuits radio et analogiques.



La bande de fréquences des 3,1-4,8 GHz est suffisante pour trois sous-bandes de 500 MHz, comme l'illustre la figure 22.8.

Figure 22.8

Allotissement des fréquences  
pour un système MB-OFDM

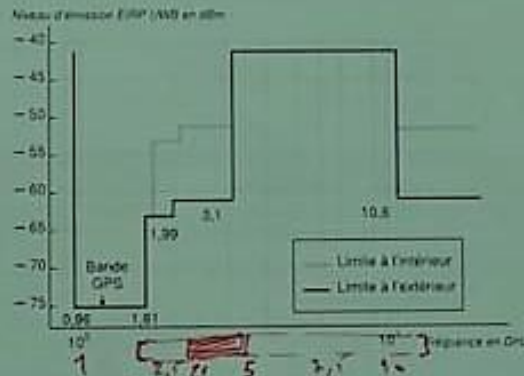


Dans le groupe de travail IEEE 802.15.3, deux solutions ont été développées, une sur la bande classique des 2,4 GHz, qui atteindra une vitesse de 54 Mbit/s effective, et une qui utilise l'ensemble de la bande passante entre 3,1 et 10,7 GHz, mais à une puissance très faible, en dessous du bruit ambiant. De la sorte, cette solution ne gênera pas les applications civiles et militaires utilisant ces bandes.

Le spectre visé par cette technologie est illustré à la figure 22.9.

Figure 22.9

Partie du spectre pouvant  
être utilisée par l'UWB



En dépit de la très faible puissance utilisée, la bande passante de plus de 7 GHz permet d'obtenir une vitesse située entre 120 et 480 Mbit/s en fonction des perturbations externes.

Une des propriétés de l'UWB est de pouvoir prendre en charge des communications avec des équipements qui se déplacent à relativement faible vitesse. L'objectif est de connecter et déconnecter ces équipements en des temps extrêmement courts, de l'ordre de la seconde.

#### Flexibilité spectrale

Étant donné la nature du spectre utilisé par l'UWB, tous les équipements sans fil qui partagent doivent pouvoir coexister. Indépendamment des attributions et des restrictions spectrales actuelles ou futures dans diverses régions du monde, MB-OFDM est capable de s'adapter aux règlements locaux en modifiant dynamiquement de façon logicielle les canaux concernés. Cette flexibilité, que l'on ne trouve pas dans les solutions concurrentes, a permis l'adoption mondiale des systèmes UWB.



### Complexité et énergie

Le système MB-OFDM a été spécifiquement conçu pour être le plus simple possible. Une seule chaîne de réception analogique rend l'architecture globale d'une grande simplicité en limitant les symboles transmis à une modulation QPSK. L'espacement relativement grand entre les porteuses permet de réduire le bruit sur les circuits et d'améliorer la robustesse aux erreurs de synchronisation.

La durée de vie des batteries pour les mobiles est un facteur critique pour les utilisateurs. L'accès de type MB-OFDM est capable de tenir plusieurs heures dans des conditions typiques avant qu'une recharge ne soit exigée.

La figure 22.10 illustre les puissances nécessaires, en fonction du débit, estimées pour un système MB-OFDM avec un cœur CMOS de 90 microns.

Débit	Puissance de transmission	Puissance en réception	Puissance en cours de sommeil
110 Mbps	93 mW	155 mW	15 $\mu$ W
200 Mbps	93 mW	169 mW	15 $\mu$ W

Figure 22.10

Énergie nécessaire pour l'UWB

### Sécurité

La technologie UWB est conçue pour embarquer les éléments nécessaires pour que la sécurité soit assurée en permanence. Des mécanismes de confidentialité sont mis en application à plusieurs niveaux protocolaires afin d'assurer la robustesse nécessaire aux environnements sans fil tout en restant transparents pour les utilisateurs.

L'expérience acquise au fur et à mesure de la croissance des réseaux Wi-Fi et Bluetooth ont également guidé les choix effectués pour l'architecture de sécurité. La plupart des solutions mises en œuvre sont identiques à celles promues par la norme IEEE 802.11, que nous détaillons au chapitre suivant.

La sécurité des communications est assurée par une authentification et un chiffrement de l'information. L'authentification utilisera sûrement le protocole EAP-TLS (Extensible Authentication Protocol-Transport Layer Security). L'utilisation de l'algorithme AES (Advanced Encryption Standard) avec une clé de 128 bits doit garantir la sécurité du transport de l'information.

### Topologie

La topologie des réseaux UWB est en tout point similaire à celle des réseaux Bluetooth, avec des piconets et des scatternets. Les connexions et déconnexions d'une machine à l'intérieur d'un piconet ou à l'intérieur d'un scatternet proviennent essentiellement du déplacement des machines terminales.

Les réseaux UWB pourront fonctionner en mode ad-hoc. La qualité de service sera assurée par l'utilisation simple d'une technique TDMA par découpage dans le temps et l'utilisation de slots déterministes pour les différentes connexions simultanées.



### Les couches supérieures

La figure 22.11 illustre différents appareils susceptibles de faire partie d'un réseau UWB.

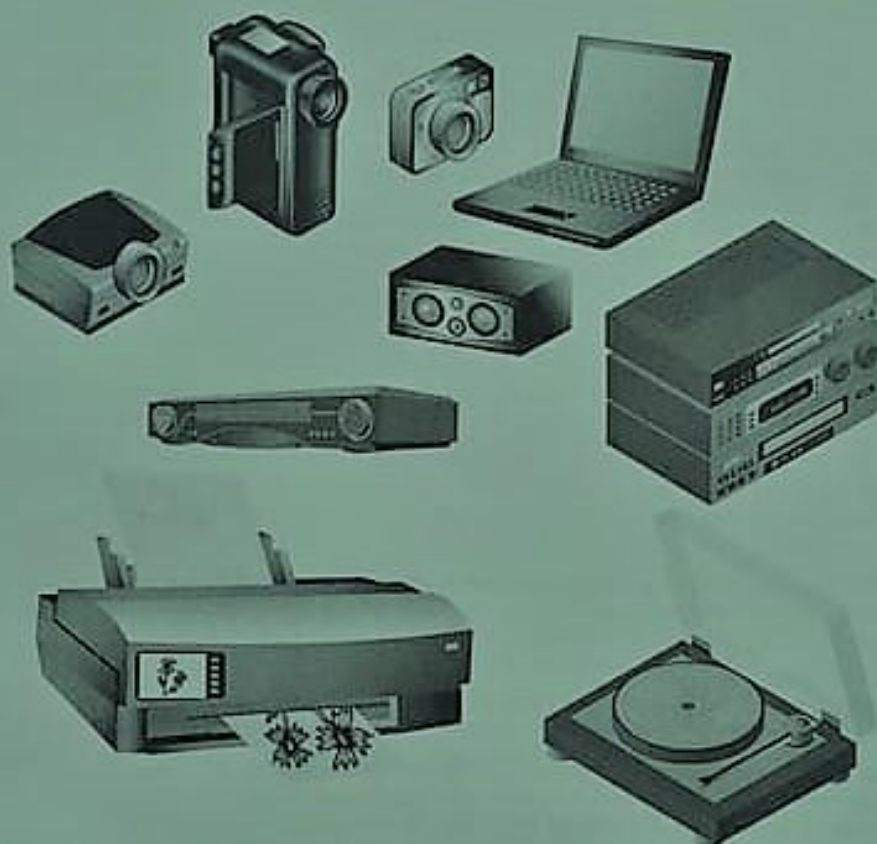


Figure 22.11  
Réseau UWB

L'initiative WiMedia prend en compte plus de couches protocolaires que la simple interface physique. Au-dessus de la couche de communication, deux grandes fonctionnalités devraient être disponibles, l'une concernant la définition de profils applicatifs, comme les applications de streaming, d'imprimante, etc., l'autre la découverte de service.

Le premier logiciel a pour objectif de décider d'une valeur du débit de la connexion en fonction des équipements connectés, ce qui facilitera énormément la négociation entre équipements pour définir un débit déterminé. Le second logiciel doit pouvoir indiquer à l'utilisateur les services disponibles autour de lui, comme une imprimante, un serveur de messagerie électronique, un vidéo-projecteur, etc.



La plate-forme de découverte de service n'est pas étudiée par le groupe UWB mais devrait être choisie chez un partenaire tiers. Les réseaux UWB offrent de nombreuses fonctionnalités intéressantes, qui déboucheront nécessairement sur des produits nouveaux. La faible complexité du système et sa très basse consommation en font un produit particulièrement bon marché pour les communications à haut débit.

### Le marché de la WiMedia Alliance

UWB est une technologie radio sans fil pour la transmission point-à-point entre équipements électroniques grand public, les périphériques PC et les dispositifs mobiles, sur de courte distance et à très grande vitesse, tout en consommant peu de puissance. Elle est bien adaptée au transfert de données multimédias, tel que la transmission sans fil de vidéos à partir d'un magnétoscope numérique vers une télévision haute définition dans le salon ou d'un PC mobile vers un vidéo-projecteur dans une salle de conférence pour réaliser une présentation sur grand écran.

Une grande valeur est attachée à la mise en place de dispositifs permettant aux équipements de se découvrir automatiquement et de communiquer, d'imprimer ou de demander un service sans intervention des utilisateurs. En règle générale, cette découverte automatique est impossible au travers d'un environnement câblé utilisant des interfaces incapables de communiquer entre elles.

L'adoption rapide des communications UWB dépendra de leur facilité d'utilisation et de leur coût. Les utilisateurs sont en outre en droit d'attendre un système fiable et fortement testé.

L'interopérabilité est une question clé pour permettre des opérations transparentes pour l'utilisateur, indépendamment des fabricants choisis. Par conséquent, il est crucial que la standardisation des protocoles soit effectuée et que l'ensemble des protocoles soit incorporé dans une plate-forme unifiée, notamment les suivants :

- **USB (Universal Serial Bus)**. Conçue au départ pour raccorder par câble des périphériques à un PC, cette interface est surtout utilisée pour le transfert de données.
- **IEEE 1394**, également connu sous le nom de FireWire. Spécifiquement conçu pour transmettre des flux multiples de types divers, comme l'audio et la vidéo, cette norme a été adoptée dans beaucoup de foyers pour remplacer les systèmes hétérogènes de diffusion audio, vidéo et de jeu.
- **Bluetooth**. L'objectif de cette technologie était de remplacer les câbles mais à des débits relativement faibles, tels qu'on en trouve dans les téléphones portables, ordinateurs personnels, PDA, écouteurs, etc.

Si chacun de ces protocoles correspond à des segments de marché différents, les consommateurs en souhaitent l'interopérabilité sans couture. À cet effet, des consortiums d'industriels, comme DLNA (Digital Living Network Alliance), que nous détaillons au chapitre 28, essayent de définir des solutions d'interopérabilité complète à l'intérieur de la maison.

Parmi les applications ciblées, citons notamment les suivantes :

- Téléchargement depuis un caméscope vers un PC pour traitement, puis vers la télévision.



- Synchronisation des données d'un PDA vers un PC.
- Chargement de jeux audio/vidéo vers un PDA.
- Liaison d'un ordinateur portable vers une console de jeu.
- Passerelle résidentielle vers un serveur de jeux.
- Transfert de fichiers audio vers un lecteur MP3 à partir d'une base de données située sur un serveur de la maison.
- Télévision haute définition (HDTV) depuis ou vers le téléviseur pour stocker ou jouer des films. Cette application demande un débit de l'ordre de 20 Mbit/s.
- Communication d'un téléphone portable vers une oreilleuse.
- Transferts de photos d'un appareil numérique ou d'un téléphone portable.
- Téléchargement de jeux ou de films d'un point d'accès sans fil à un portable dans un lieu public tel qu'une gare.
- Téléchargement d'une présentation vers un vidéo-projecteur.

### Autres applications UWB

La partie du spectre choisie par l'UWB est également utilisée pour des applications telles que les radars de contrôle de collision et de découverte d'obstacle, les systèmes de positionnement de personnes, les systèmes d'inventaire automatique et les systèmes de transport intelligent. Plusieurs sociétés développent des technologies pour satisfaire des besoins spécifiques de communication sans fil robuste et sécurisée dans divers secteurs, tels que la santé, les opérations d'urgence ou les environnements militaires.

Dans le domaine de la santé, la localisation des équipements de diagnostic ou le transfert des données des patients dans les milieux hospitaliers peuvent être réalisés par le biais de plates-formes logicielles/matérielles en indiquant le cheminement des objets grâce à un contact radio permanent par le biais d'un réseau de capteurs placés dans le bâtiment.

Dans les opérations de secours, ces systèmes peuvent permettre le positionnement de personnes physiques prises dans un feu ou un accident de produits toxiques ou lors d'un acte de terrorisme. Dans ce dernier cas, signalons que le NASC (Naval Air Systems Command) américain a commandé des systèmes d'intercommunication entre avions par UWB nommés AWICS (Aircraft Wireless Intercommunication Systems).

### Les réseaux ZigBee

Les réseaux ZigBee sont l'inverse des réseaux UWB. Leur objectif est de consommer extrêmement peu d'énergie, de telle sorte qu'une petite batterie puisse tenir presque toute la durée de vie de l'interface, mais à un débit extrêmement faible.

Deux types de transferts sont privilégiés dans ZigBee : la signalisation et la transmission de données basse vitesse.

peu d'énergie  
peu de débit.

Signalisation.  
Transmiss. Débit faible.  
(Max 250Kbps)



La figure 22.12 illustre un environnement ZigBee pour la domotique.

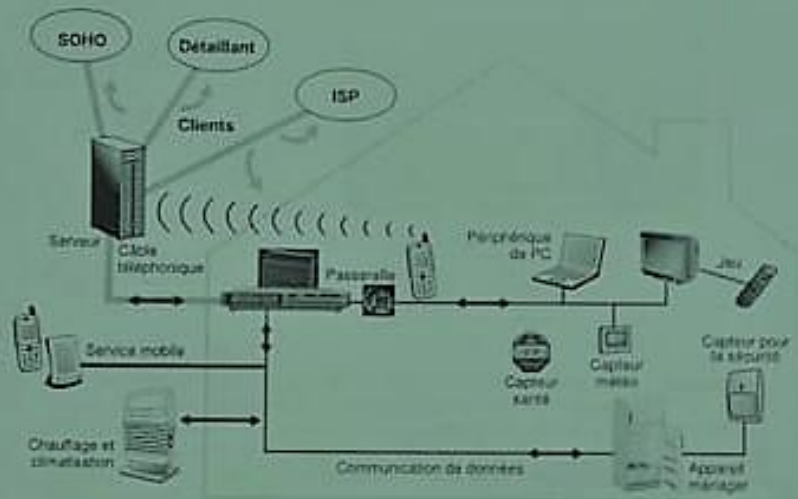


Figure 22.12

*Exemple ZigBee pour la domotique*

Dans la normalisation, ZigBee peut avoir trois vitesses possibles :

- 250 Kbit/s avec la bande classique des 2,4 GHz ;
- 20 Kbit/s avec la bande des 868 MHz disponible en Europe ;
- 40 Kbit/s avec la bande des 915 MHz disponible en Amérique du Nord.

Ces différentes possibilités sont illustrées à la figure 22.13.

	Bande	Couverture	Débit données	Nombre de canal
2,4 GHz	ISM	Mondiale	250 Kbit/s	16
868 MHz		Europe	20 Kbit/s	1
915 MHz	ISM	Amerique	40 Kbit/s	10

Figure 22.13

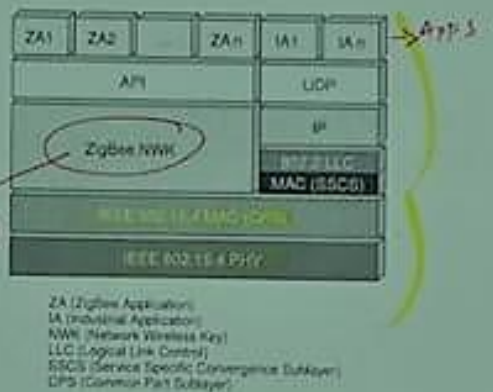
*Bandes de fréquence et débits de ZigBee*

Les réseaux ZigBee devraient arriver en force sur le marché de la commande et des bas débits dans les domaines de la domotique, de la bureautique et de l'automatisme.



Figure 22.14

Architecture d'un réseau ZigBee



Comme illustré à la figure 22.14, l'architecture d'un réseau ZigBee contient cinq grandes couches. En partant du sommet, on trouve la couche applicative, qui utilise des profils applicatifs prédéterminés, la couche sous-jacente, qui correspond à l'interface applicative ou au protocole UDP si l'application est à distance, la couche ZigBee proprement dite, qui gère la topologie, le routage, la découverte de protocole et la sécurité, la couche MAC et la couche physique.

### Le niveau applicatif

L'architecture protocolaire de ZigBee comporte des couches provenant de l'IEEE 802.15.4, comme la couche de contrôle d'accès (MAC) et la couche physique (PHY) associées à la couche réseau de ZigBee (NWK). Les parties de la pile protocolaire qui nous intéressent dans cette section correspondent à la couche ZA et à l'API illustrée à la figure 22.14. La couche application de ZigBee comprend une sous-couche, le ZDO (ZigBee Device Object), déterminant les objets définis dans les équipements connectés. La sous-couche ZDO contient les tables de maintien des dispositifs d'association. Les responsabilités du ZDO incluent le rôle de l'équipement dans le réseau (coordonnateur ZigBee ou dispositif d'extrémité), la découverte des équipements dans le réseau et la détermination des services applicatifs.

Une API a été définie entre la couche réseau (NWK) et la couche applicative ZA. Cette interface contient un ensemble de services employés par le ZDO pour permettre aux objets applicatifs de communiquer avec la couche réseau.

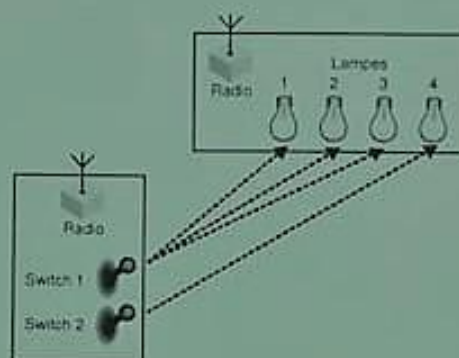
### L'adressage

L'exemple de connexion ZigBee illustré à la figure 22.15 comporte deux équipements communicants, l'un contenant deux commutateurs et l'autre quatre lampes.

Une adresse est donnée à chaque équipement au moment de la connexion au réseau ZigBee. L'interrupteur 1 doit commander les lampes 1, 2 et 3 tandis que l'interrupteur 2 doit éclairer la lampe 4. ZigBee propose un sous-adressage de l'équipement élémentaire qui permet de réaliser ces communications.



Figure 22.15  
Exemple de connexion ZigBee



La découverte des équipements ZigBee environnants s'effectue par des demandes en broadcast. Les adresses récupérées sont soit de type IEEE, soit de la couche réseau de ZigBee, c'est-à-dire NWK. Un échange s'ensuit permettant de découvrir le profil des équipements connectés. Les profils ZigBee sont la clé des communications entre composants ZigBee. Un exemple de profil serait celui d'un interrupteur électrique. Les équipements sont architecturés pour échanger des messages normalisés permettant de déterminer le profil.

La couche réseau fournit la fonctionnalité permettant d'utiliser la sous-couche IMPEK d'IEEE 802.15.4. La couche NWK fournit deux services, consultés par deux points d'accès de service : le service de données et le service de gestion de NWK. Ces deux services fournissent l'interface avec la couche application et la couche IMPEK.

La sécurité a été fortement introduite dans l'environnement ZigBee avec l'utilisation d'un chiffrement AES et une clé de 128 bits. Globalement, on retrouve la sécurisation introduite par WPA2 dans l'environnement Wi-Fi (voir le chapitre 23).

## Conclusion

Les réseaux personnels forment encore aujourd'hui un vaste ensemble de solutions allant du très haut débit au très faible débit, avec des consommations électriques très diverses.

Deux grands axes semblent se mettre en place : le haut débit avec UWB et la très basse consommation avec ZigBee. La solution UWB est utilisée par de nombreux réseaux, notamment Bluetooth 3.0, WUSB, FireWire. La solution ZigBee est en bonne voie pour devenir un standard industriel, mais d'autres propositions, notamment à l'IETF avec 6LoWPAN, sont toujours en course.