

LES RESEAUX WLAN

Jean-Claude BIC GET/Télécom Paris

1) Introduction

Les premiers réseaux locaux sans fil (WLAN Wireless Local Area Network) ont été introduits dans le but de se substituer aux réseaux filaires à l'intérieur des bâtiments et de fournir un accès radio du type Ethernet en offrant des gammes de service et donc de débits comparables mais avec l'avantage d'une mobilité supplémentaire même si elle est faible par rapport à celle de réseaux cellulaires mobiles. Cet objectif initial a été étendu à un accès sans fil large bande et une connectivité aux réseaux IP mais a également donné naissance à de nombreux autres types de réseaux sans fil qu'on peut désigner sous l'acronyme WxAN, qui se distinguent par la nature des services offerts et donc des débits, des bandes de fréquence et qui sont conçus pour être les mieux adaptés à leur environnement.

Le propos de cette présentation est de faire le point sur les nombreux réseaux sans fil existants normalisés ou en cours de normalisation en mettant l'accent essentiellement sur les aspects Couche Physique

2) Les différents réseaux WxAN

En règle générale, les débits offerts varient à l'inverse de la mobilité, les réseaux cellulaires étant les seuls à pouvoir fonctionner pour une mobilité correspondant à celle d'un véhicule comme le montre la figure 1. Les WxAN offrent donc une mobilité réduite mais des débits plus importants que ceux d'un réseau cellulaire et ils sont donc complémentaires pour apporter dans des environnements où il est nécessaire d'avoir des hauts débits une capacité supplémentaire

Les WxAN peuvent se ranger en trois catégories :

- les WLAN ont été conçus pour offrir un accès large bande radio avec des débits de plusieurs Mbit/s pour relier des équipements de type PC et autres équipements électroniques ou informatiques dans des environnements professionnels, immeubles de bureaux, bâtiments industriels ou grand public et se connecter à un réseau cœur, tel qu'un réseau Ethernet. Ils sont déployés dans des lieux privés mais aussi dans des lieux publics gare, aéroports, campus (hot spots). Ils sont complémentaires des réseaux cellulaires 2G et 3G qui offrent une plus grande mobilité mais des débits plus faibles. Deux grandes familles se partagent le domaine des WLAN résultant des travaux menés aux Etats-Unis et en Europe. La première famille est celle du WiFi nom donné à la norme IEEE 802.11b qui est actuellement la plus populaire pour offrir des débits jusqu'à 11 Mbit/s pour des distances de 10 à 100 m. Une évolution pour des débits jusqu'à 22 Mbit/s est en cours de définition. La seconde famille est celle de l'HIPERLAN2 et de IEEE 802.11a basée sur l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) plus robuste aux distorsions sélectives en fréquence du canal, offrant des débits jusqu'à 54 Mbit/s mais au prix d'une complexité plus grande.

Mobilité

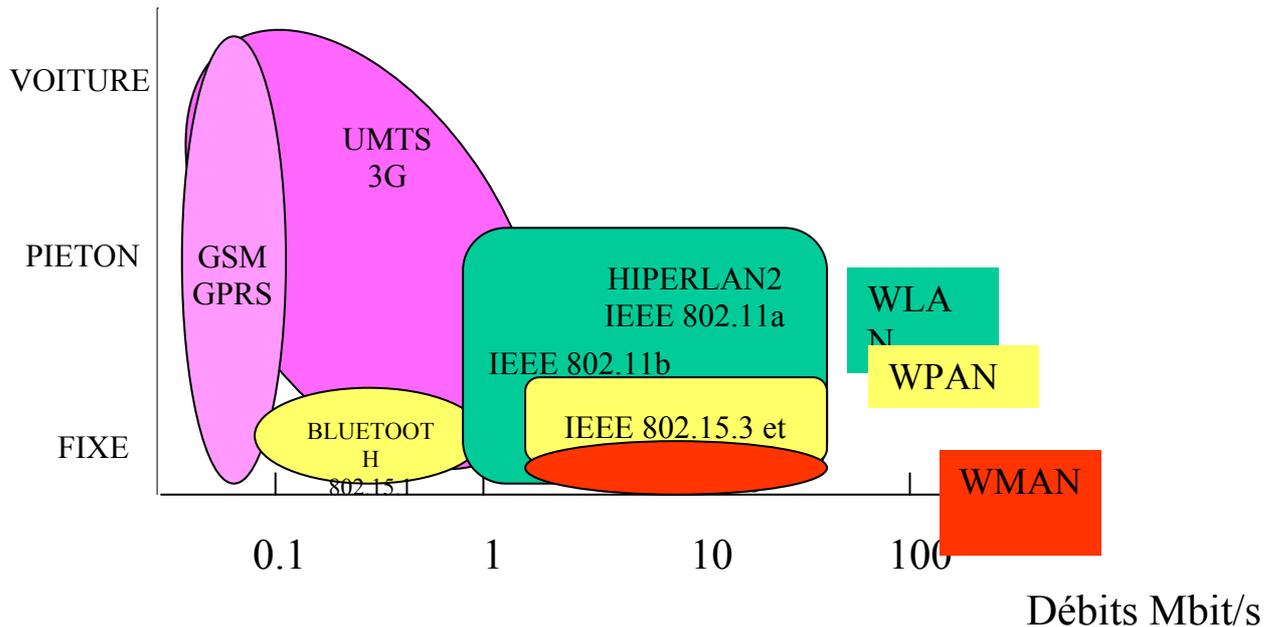


Figure 1 : Mobilité et Débits

- Les WPAN (Wireless Personal Area Networks) dont le précurseur a été le système Bluetooth sont complémentaires des WLAN. Ils visent des environnements de type plutôt résidentiel (Home Networking) avec des services de haut débit de type connexions « loisirs » (Home Entertainment) avec des caméras numériques, TV, vidéo temps réel, transferts haut débit (vidéo stream) mais aussi des services de plus bas débit de type domotique (ou maison intelligente) pour la sécurité, télésurveillance, l'automatisation de la maison ou autre service mettant en œuvre des réseaux de capteurs. Un vidéo temps réel peut représenter un débit de l'ordre de 30 Mbit/s, un DVD de l'ordre de 9,8 Mbit/s et un Stream MPEG2 19,2 Mbit/s ; bien que ce soient des applications plutôt grand public ces débits requièrent un accès large bande.

Le système Bluetooth ne peut fournir qu'un débit de 1 Mbit/s (en fait plutôt de 780 kbit/s) qui est insuffisant pour ce type de services ce qui explique que d'autres WPAN soient en cours de développement. Les WLAN pourraient fournir ce type de débits mais ils offrent par ailleurs de nombreuses fonctionnalités au niveau des couches réseau supérieures qui ne sont pas nécessaires pour ce type d'interconnexions. Or un des objectifs des WPAN est le faible coût des circuits et la faible consommation. En revanche les applications domotique se contentent d'un débit de quelques kbit/s. Cela explique que plusieurs interfaces radio soient proposées au-delà de Bluetooth. Les WPAN sont regroupés au niveau normalisation dans la famille IEEE 802.15, 15.3 pour les hauts débits, 15.4 pour les bas débits, Bluetooth pouvant être considéré comme le 15.1.

- Les WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) sont l'accès radio large bande fixe pour l'extérieur des bâtiments en remplacement d'un réseau câblé, filaire ou

optique ou d'un réseau ADSL avec une structure un peu similaire à celle d'un réseau cellulaire avec une station de base et une réception à partir d'une antenne extérieure au bâtiment. Le WMAN constitue un accès pour les réseaux WLAN, WPAN qui se trouvent à l'intérieur du bâtiment mais il est envisageable que certains protocoles réseaux (mais pas au niveau de l'interface radio) permettent d'assurer une liaison entre la BS et l'équipement individuel. Les WMAN sont normalisés dans le cadre de l'IEEE 802.16.

3) Les bandes de fréquences

Les deux bandes de fréquence les plus utilisées pour des communications à l'intérieur de bâtiments par les WxAN sont :

- la bande ISM de 2,4 à 2,5 GHz où il est possible d'émettre sans licence ; cette bande est utilisée par toutes sortes d'applications et les perturbations y sont très nombreuses , par exemple dans un environnement domestique les radiations émises par les fours à microondes,
- la gamme des 5 GHz (300 MHz disponible aux USA, 455 MHz en Europe)

Actuellement, il n'existe pas de WLAN ou WPAN précisément défini au niveau international dans les bandes millimétriques pour des applications à l'intérieur des bâtiments malgré les nombreux travaux menés depuis plusieurs années dans ce domaine en Europe et au Japon. La raison en est vraisemblablement la non maturité de technologie électroniques bas-coût. Les bandes 2-11 GHz et 10-66 GHz (ou plutôt des sous-bandes de celles-ci notamment 2,5-2,7 GHz et autour de 3,5 GHz pour les applications de type MMDS) sont celles retenues pour les WMAN.

4) L'environnement de propagation des WxAN

Les réseaux WLAN et WPAN ont été conçus pour offrir des communications à l'intérieur des bâtiments . Les portées recherchées sont relativement courtes et vont de un à une centaine de mètres.

Comme tout système radio le premier élément à examiner concerne la propagation. La propagation à l'intérieur des bâtiments a fait l'objet de nombreuses études (voir par exemple [Hashemi]). Pour permettre la mobilité les antennes sont relativement peu directives et pour des distances de quelques mètres dans une pièce ou de quelques dizaines de mètres sur un étage par exemple des trajets multiples , décalés dans le temps, atténués et déphasés vont apparaître. Dans ces conditions le canal est habituellement caractérisé par une réponse impulsionnelle variable dans le temps t (ou plutôt dans l'espace) sous la forme :

$$h(t,\tau) = \sum_{k=1}^{k=N} a_k(t) \delta(\tau - \tau_k(t))$$

$$a_k(t) = \rho_k(t) \exp j\phi_k(t)$$

Dans le cas qui nous intéresse on pourra considérer que les a_k et les τ_k ne dépendent pas de t . L'amplitude a_k de chaque trajet est lui-même le modélisé par un processus aléatoire de type Rayleigh (lorsque il n'y a pas visibilité NLOS) et Rice lorsqu'il y a un trajet en visibilité

(LOS). On prend assez souvent une décroissance exponentielle des puissances (figure 2) pour les différents retards ce qui suppose (cas non général) que le premier trajet est le plus puissant.

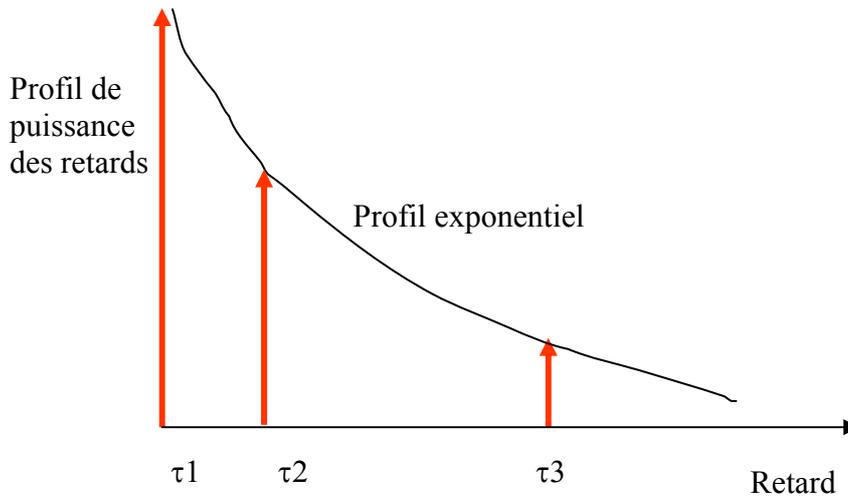


Fig 2 : Profil de puissance des retards à l'intérieur de bâtiments

Les retards τ_k sont habituellement caractérisés par leur dispersion (moment du second ordre) ou par leur bande de cohérence (paramètres liées et approximativement inversement proportionnel). Pour le profil exponentiel la dispersion des retards est l'exposant de décroissance. Leur importance repose sur le fait que le canal est sélectif et donc introduit des interférences entre symboles sur les signaux numériques transmis si la dispersion des retards est supérieure de la durée d'un symbole ou inversement si la bande de cohérence est inférieure à la bande des signaux transmis. Il est clair que les retards dans un bâtiment ne sont pas du même ordre de grandeur que dans un réseau macrocellulaire mais comme il s'agit d'un accès large bande occupant des bandes de plusieurs MHz ou plusieurs dizaines de MHz, ils peuvent néanmoins être très perturbateurs. La gamme de fréquences joue aussi un rôle non négligeable : les réflexions et les diffractions ne sont pas les mêmes dans pour des ondes décimétriques et centimétriques qui sont les plus fréquemment utilisées pour les WxAN Les ordres de grandeur La dispersion des retards se situe dans des fourchette de 20 à 50 ns pour des environnements résidentiels, 50 à 100 ns dans des bâtiments de bureaux et 100 à 200 ns dans des environnements plus industriels (usines) ou des gares, aéroports. Les bandes de cohérence vont de quelques centaines de kHz à des dizaines de MHz. Pour comparer des systèmes WxAN des modèles ont été recommandés comme celui figurant au tableau 1. On peut prendre également les modèles du 3GPP (UMTS) pour l'environnement intérieur bien que ceux-ci aient a priori été établis pour des largeurs de bande inférieures à celles des WLAN.

Environnement	Type d'évanouissements	Étalement des retards
Bureau NLOS	Rayleigh	50 ns
NLOS	Rayleigh	100 ns
NLOS	Rayleigh	150 ns
LOS	Rice	140 ns
NLOS	Rayleigh	250 ns

Tableau 1 : Exemple de modèles de canaux de propagation utilisés pour les simulations de performances WLAN

Pour les WMAN l'environnement de propagation est radicalement différent puisqu'il s'agit de liaisons extérieures fixes entre une station de base et une station utilisateur qui dispose d'une antenne directive. La liaison peut-être NLOS dans la bande 2-11 GHz , les dispersions des retards peuvent alors atteindre des valeurs importantes entre 0,1 et 10 μ s, mais sera impérativement LOS dans la bande millimétrique où les pertes par diffraction sont trop importantes. Dans ce dernier cas, des marges non négligeables devront être prévues pour compenser les affaiblissements dus aux hydrométéores mais les trajets multiples seront beaucoup moins perturbateurs. Les interfaces radio seront donc différentes dans les deux cas.

5) Les interfaces radio

Elles doivent respecter plusieurs critères . Tout d'abord être adaptées au canal de propagation qui est plus ou moins sensibles aux trajets multiples et aux interférences. Ensuite offrir une efficacité spectrale en bit/s/Hz la meilleure possible .

Le système Bluetooth par exemple utilise la technique du saut de fréquence (79 canaux au maximum de 1MHz dans la bande ISM avec un fréquence de 1600 sauts par seconde) essentiellement pour lutter contre les interférences nombreuses et variées dans une bande non dédiée [Birdikian]. Par contre, il ne fait pas appel à de techniques élaborées (égalisation par exemple) pour lutter contre les trajets multiples car la bande du signal utile est généralement bien inférieure à la bande de cohérence du canal pour la plupart des applications.

Dès que le débit et la bande augmente il est alors nécessaire de recourir aux techniques classiques de modulation et de codage pour lutter contre les évanouissements sélectifs car cette fois la bande de cohérence est trop faible .

Trois principales méthodes existent pour atteindre cet objectif :

- l'étalement de spectre (Spread Spectrum) et plus particulièrement l'étalement de spectre par séquence directe (DS-SS) que l'on désigne aussi sous le terme CDMA (Code Division Multiplex)
- le multiplexage en fréquence par des sous-porteuses orthogonales (OFDM),
- la transmission monoporteuse avec égalisation.

Comme on va le voir ces trois méthodes sont mises en œuvre pour différents WxAN.

Le CDMA DS-SS est la technique qui a été retenue pour les systèmes UMTS 3G en Europe et au Japon (dans le mode FDD Frequency Division Multiplex). L'idée de base est la suivante : pour éviter que le signal monoporteuse classique ne soit affecté d'un évanouissement de type Rayleigh, on va étaler le signal dans le domaine des fréquences de telle sorte que la bande du signal après étalement soit supérieure à la bande de cohérence . On rend ainsi des trajets multiples observables par le récepteur ce qui peut paraître a priori nuisible mais ceux-ci pourront être utilisés grâce à un récepteur de Rake qui va recombinaison en phase ces trajets. L'étalement s'obtient en multipliant chaque symbole d'information par des séquences comportant un certain nombre de chips. Le nombre L de trajets multiples séparables est approximativement égal au rapport de la bande du signal après étalement à la bande de cohérence. Le récepteur de Rake comportera donc L branches (en général de quelques unités). Cette méthode s'assimile donc à une diversité en fréquence d'ordre L. La contrepartie de cette technique est la nécessité d'estimer le canal , retard, amplitude et phase pour pouvoir faire la meilleure recombinaison possible. Des séquences d'apprentissage sont nécessaires pour cela. Par ailleurs, le débit en ligne exprimé en chip/s est égal au débit utile du signal porteur de l'information multiplié par la longueur de la séquence d'étalement. Cette technique a été retenue dans le cadre de la norme IEEE 802.11b avec des variantes suivant le

débit [Van Nee]. Pour les débits de 1 et 2 Mbit/s, la séquence d'étalement est une séquence de Barker de 11 chips. L'occupation spectrale (ou la vitesse de modulation) étant maintenue la même en passant d'une modulation MDP2 (1 chip par symbole de modulation) à une modulation MDP4 (2 chips par symbole). Pour les débits d'information de 5,5 Mbit/s et de 11 Mbit/s la solution adoptée est plus complexe. Elle s'appuie sur des codes (séquences) dites complémentaires ayant des propriétés d'autocorrélation particulières (une paire de codes est telle que la somme de leur fonction de corrélation est nulle sauf pour un retard nul) d'où le nom de CCK (Complementary Code Keying). Le code est composée de 8 chips, chaque chip pouvant prendre 4 valeurs complexes. Il existe 64 séquences distinctes. Pour une fréquence code de 1,375 Mbaud, le chip rate est de 11 Mchip/s comme précédemment. Pour le débit de 5,5 Mbit/s (resp. 11) 4 (resp 8) bits d'information sont associés à une code. Ce schéma présente l'intérêt d'être compatible avec les transmissions à 1 et 2 Mbit/s et de permettre une démodulation MDP différentielle (sans récupération de porteuse).

La deuxième solution s'appuie sur les techniques OFDM qui sont les mieux aptes à corriger les distorsions du canal sélectif en fréquence. L'idée est cette fois de répartir l'information non pas sur une monoporteuse de bande large qui serait altérée par des évanouissements sélectifs mais sur plusieurs sous-porteuses de bande beaucoup plus faibles, et surtout plus faibles que la bande de cohérence du canal de propagation, qui sont alors affectées par un évanouissement plat. Chaque sous-porteuse pourra être affectée d'une atténuation et d'une phase différente qui devront être estimées. Les évanouissements non sélectifs subsistants seront corrigés par les techniques habituelles de codage correcteur et d'entrelacement . Le nombre de sous-porteuses peut varier de quelques dizaines à plusieurs centaines. Il s'agit encore d'une diversité de type fréquentiel. L'analyse montre que le modulateur et le démodulateur peuvent être réalisés à partir de transformateurs de Fourier inverse et direct. Pour lutter contre l'interférences entre symboles un temps de garde est introduit entre symboles qui si il plus grand que le retard de propagation entre trajet garantit qu'il n'y a pas recouvrement des symboles venant de deux trajets. Le diagramme général d'un émetteur et d'un récepteur OFDM est donné sur la figure 3. Le récepteur est jugé plus facilement réalisable qu'un récepteur monoporteuse avec un égaliseur qui comprendrait plusieurs dizaines sinon centaines de prises.

Les systèmes HIPERLAN2 et IEEE 802.11a [Doufexi, Khun Jush] dont les interfaces radio ne diffèrent que par quelques détails (séquences d'apprentissage) sont un bon exemple de mise ne œuvre de cette technique. Ils permettent un débit maximal de 54 Mbit/s dans un canal de 20 MHz (espacement entre canaux 20 MHz). Il y a 48 sous-porteuses de données, 4 sous-porteuses pilote, espacées de 0,3125 MHz soit une bande totale de 16,875 MHz, la durée d'un symbole est de 4 μ s (3,2 pour le symbole proprement dit et 0,8 μ s pour le temps de garde. La modulation est réalisée sous forme d'une FFT de taille 64. Il faut souligner l'adaptativité de ces systèmes avec plusieurs combinaisons de rendement de codage correcteur (par poinçonnage du code convolutif de base $R = 1/2$) et de nombre d'états de modulations qui sont récapitulés dans le tableau 2. Le choix de ceux-ci, l'adaptation de lien, dépend des conditions de propagation et est basé sur des estimations du taux d'erreur bit ou paquet , du niveau de signal reçu,... Les performances exprimées en termes de taux d'erreur paquet vs.C/N (puissance porteuse à puissance de bruit) dépendent du mode utilisé passant par exemple pour le premier modèle du tableau 2 pour un TEP de 10^{-2} de 12 pour le mode 1 à 30 dB pour le mode 7 en HIPERLAN2. En outre, des techniques d'ARQ sont mises en œuvre (32 bits de parité et répétition par stop and wait en IEEE, 24 ou 16 et répétition sélective en HIPERLAN2). L'inconvénient de ces techniques est qu'elles sont relativement coûteuses au niveau de la réalisation par rapport au WiFi même si des progrès sont attendus pour la réalisation sur un seul circuit [Grass]

	Modulation	Codage	Débit (Mbit/s)	
1	MDP2	$\frac{1}{2}$	6	
2	MDP2	$\frac{3}{4}$	9	
3	MDP4	$\frac{1}{2}$	12	
4	MDP4	$\frac{3}{4}$	18	
5	MAQ 16	$\frac{9}{16}$	27	Hiperlan/2 seulement
5	MAQ 16	$\frac{1}{2}$	24	IEEE seulement
6	MAQ 16	$\frac{3}{4}$	36	
7	MAQ 64	$\frac{3}{4}$	54	
8	MAQ 64	$\frac{2}{3}$	48	IEEE seulement

Tableau 2 : Paramètres de l'interface radio HIPERLAN/2 et IEEE 802.11.a

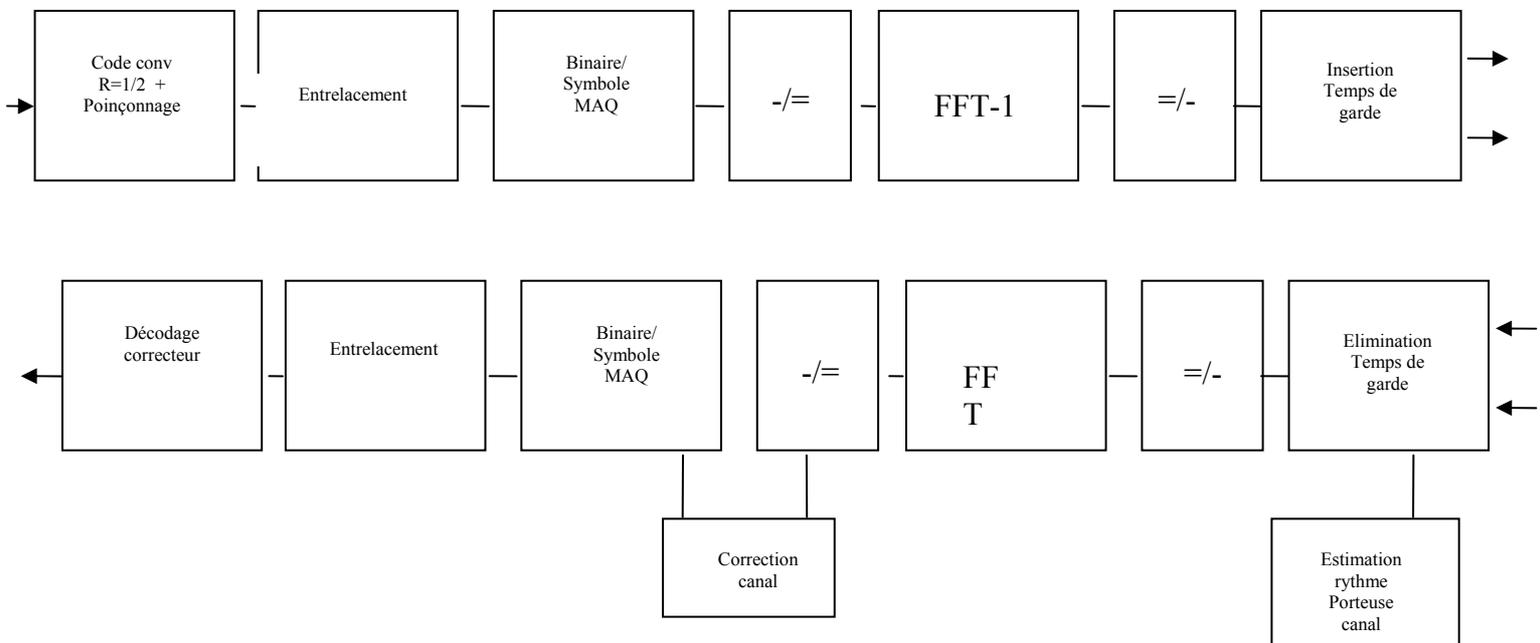


Figure 3 : schéma d'un émetteur et d'un récepteur OFDM

La même technique OFDM est préconisée pour les WMAN 2-11 GHz en situation de NLOS car là aussi les trajets multiples seront préjudiciables. Les bandes de cohérence étant plus faibles le nombre de sous-porteuses devra être augmenté et des valeurs de 256 jusqu'à 4096 ont été proposées pour des canaux de 6 MHz ce qui correspond à des largeurs de sous-porteuses de quelques kHz.

Dans tous les cas l'adaptation du nombre d'états de la modulation et du rendement du codage sur une base paquet est prévue, ce qui suppose de pouvoir avoir des estimations relativement fiables du canal et des différentes horloges.

Une autre solution envisagée pour les WPAN est celle de la modulation monoporteuse codée en treillis où la faible portée (< 10 m) limite la longueur des trajets multiples ce qui explique que les techniques d'égalisation soient utilisables avec des égaliseurs de taille raisonnables (égaliseur à retour de décision avec 8 coefficients avant et 6 coefficients arrière) [Karaoguz]. Elles sont adéquates pour des dispersions de retard allant jusqu'à 75 ns et des débits de 55 Mbit/s.

Les principales interfaces radio sont récapitulées dans le tableau 4

	Gamme de Fréquence	Débit (Mbit/s)	Modulation	Codage Correcteur	Remarques
WLAN					portée de l'ordre de 100 m intérieur
IEEE 802.11a	5 GHz	6 – 54 Mbit/s	OFDM	Convolutif Poinçonné k=7	
HIPERLAN2	5.15 – 5,350 GHz 5,47 – 5,725 GHz	6 – 54 Mbit/s	OFDM	Convolutif Poinçonné k=7	bande supérieure aussi extérieure
IEEE 802.11b	2,4 - 2,5 GHz	1 et 2 Mbit/s	MDP2, MDP4 DSSS Barker		
		5,5 et 11 Mbit/s	MDP4 CCK		
IEEE 802.11g		22 Mbit/s	OFDM MDP8 CT		
WPAN					portée de l'ordre de 10 m intérieur
Bluetooth 802.15.1	2,4 - 2,5 GHz	1 Mbit/s	MDF		
IEEE 802.15.3	2,4 – 2,4835 GHz	11 – 55 Mbit/s (11 Mbaud)	MDP4, MDP4 et MAQ CT		+ Egalisation
IEEE 802.15.4	868 MHz	20 kbit/s	MDP2 AMRC/SD 0,3 Mchip/s		En cours de définition Peu de contraintes sur la QoS
	902-928	40 kbit/s	MDP2 AMRC/SD 0,6 Mchip/s		
	2,4 - 2,4835 MHz	250 kbit/s	MSK AMRC/ortho 16 symboles		
WMAN					portée 100 m à qq km extérieur
IEEE 802.16	2-11 GHz	Qq Mbit/s	OFDM		NLOS qq km
	10-66 GHz	Diz Mbit/s	MDP4 MAQ 16 et 64	Reed-Solomon CG (256) Taille et rendement variables	LOS

Tableau 4 : Principales interfaces radio des WxAN

6) Perspectives

La tendance déjà constatée vers l'augmentation des débits se poursuivra très vraisemblablement pour monter vers des débits de 100 Mbit/s avec une mobilité type véhicule et 1 Gbit/s pour une mobilité très réduite (transportable plutôt que mobile). On assistera également à une intégration des WLAN avec les réseaux cellulaires dans la prochaine génération 4G pour assurer une continuité de service mais les interfaces radio resteront différentes [Salkintzis].

Une des techniques actuellement en plein développement qui permet d'augmenter le débit est le MIMO (Multiple Input-Multiple Output) La théorie de l'information a montré qu'elle pouvait augmenter de façon linéaire la capacité d'un canal à antennes multiples à l'émission et à la réception en fonction du nombre d'antennes. Plusieurs variantes sont possibles avec traitement au récepteur uniquement (Vertical-Bell Laboratories Layered Space Time et Space-Time Coding avec Maximum Likelihood Detection) ; à l'émetteur uniquement ou dans les deux [Murch]. Cette technique est une généralisation de la diversité spatiale d'antennes. Elle suppose un canal « riche » en trajets multiples de façon à établir entre les différentes antennes émission et réception des canaux de propagation indépendants. C'est en particulier le cas des WMAN. Un MIMO 2x3 conjugué avec une interface de type OFDM permet ainsi de multiplier par un facteur de plusieurs unités l'efficacité spectrale [Gesbert].

La combinaison des techniques OFDM et CDMA (Multi-Carrier CDMA) devrait permettre également de mieux s'adapter à des bandes de signal de plus en plus grandes vis-à-vis des bandes de cohérence.

De nouvelles techniques de codage/décodage correcteur plus performantes que les techniques utilisées actuellement en OFDM (convolutif + décodage de Viterbi) tels que les turbo-codes avec décodage itératif seront mises en œuvre. Des gains de 1 à 3 dB pour des canaux à évanouissements sélectifs et de 4 dB pour des évanouissements de Rayleigh sont possibles [Classon].

La montée vers la gamme des ondes millimétriques permettra d'offrir de nouvelles bandes de fréquence beaucoup plus larges pour des WLAN et WPAN (5 GHz dans la bande de 60 GHz) avec des conditions de propagation très différentes [Bria].

Enfin, une nouvelle technique très différente se développe pour des applications WxAN, l'Ultra Wide Band [UWB]. Contrairement aux précédentes elle n'utilise pas à proprement parler une modulation avec une porteuse sinusoïdale mais une transmission par modulation d'impulsions en position très courtes inférieures à la ns telles que le spectre est étalé sur une bande très large 3 à 10 GHz avec une densité spectrale très faible située dans le niveau de bruit. L'accès multiple est assuré par des sauts d'intervalles de temps. L'intérêt essentiel réside dans la possibilité d'exploiter ce type de réseaux sans aucune licence. Les débits peuvent aller de quelques dizaines de kbit/s pour des applications de type réseaux de capteurs dans un environnement industriel à des débits de plusieurs dizaines de Mbit/s pour des applications WPAN. La résolution temporelle extrêmement fine permet l'élimination de trajets multiples à condition de maîtriser la synchronisation.

Bibliographie

C. Birdikian : An overview of the Bluetooth wireless technology

IEEE Com. Mag. June 2002, pp. 86-94

A. Bria et al. : 4th-generation wireless infrastructures, scenarios and research challenges
IEEE Personal Com., Dec 2001, pp. 25-31

Ed Callaway et al : Home networking with IEEE 802.15.4 : a developing standard for low rate WPAN
IEEE Com. Mag. August 2002, pp. 70-76

B. Classon, K. Blankenship, V. Desai : Channel coding for 4G systems with adaptive modulation and coding.
IEEE Wireless Communications, April 2002, pp. 8-13

A. Doufexi et al. : A comparison of the HIPERLAN2 and IEEE 802.11 WLAN Standards
IEEE Com Mag. May 2002 pp 172-180

C. Eklund et al : IEEE Standard 802.16 : a technical overview of the WMAN air interface for broadband wireless access
IEEE Com. Mag. June 2002, pp.98-107

D. Gesbert et al. : Technologies and performances for NLOS broadband wireless access networks
IEEE Com. Mag. April 2002, pp. 86-95

E. Grass et al. : On the single-chip implementation of a Hiperlan2 and IEEE 802.11a capable modem
IEEE Personal Com. Dec 2001, pp 48-57

H. Hashemi : The Indoor Propagation Channel
Proc. IEEE, July 1993, pp. 943-968

J. Karaoguz : High rate WPAN
IEEE Com. Mag. Dec. 2001, pp. 86-94

J. Khun Jush et al. : HIPERLAN2 : Broadband wireless communications at 5 GHz
IEEE Col. Mag. June 2002 pp 130-136

J. Koffman, V. Roman : Broadband wireless access solutions based on AOFDM access in IEEE 802.16
IEEE Com. Mag. April 2002, pp. 96-103

R.D. Murch, K. Ben Letaief : Antenna systems for broadband wireless access
IEEE Com. Mag. , April 2002 , pp. 76-83

A.Salkintzis, C. Fors, R. Pazhyannur : WLAN-GPRS integration for next-generation mobile data networks.
IEEE Wireless Com., Oct. 2002, pp. 112-124
UWB : IEEE J-SAC Dec 2002, Numéro spécial sur l'UWB

R. Van Nee et al. : New high rate wLAN standards.

IEEE Com. Mag. Dec 1999, pp. 82-88