



Les réseaux sans fil

- Généralités
 - Les liaisons radio
 - Les modulations
 - L'accès au support
 - Classification des RSF
- Réseaux personnels WPAN
 - Bluetooth IEEE 802.15.1
 - ZigBee IEEE 802.15.4
 - 6LowPAN
 - ZWave
- Réseaux locaux WLAN
 - WiFi IEEE 802.11
 - UWB IEEE 802.15.3
- Réseaux d'accès WMAN
 - WiMAX IEEE 802.16



UNIVERSITÉ
PARIS-EST
MARNE-LA-VALLÉE

Stéphane Lohier
lohier@univ-mlv.fr



1

Généralités

Les liaisons radio

- Les données sont transmises grâce à la propagation électro-magnétique possible dans l'air ambiant.

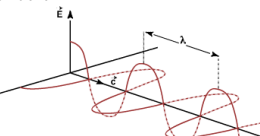



Diagram illustrating the propagation of electromagnetic waves. The electric field (E) and magnetic field (B) are shown as perpendicular sinusoidal waves. The wavelength (λ) is indicated, and the speed of light (c) is shown as the propagation velocity.

Legend:


- \vec{E} : champ électrique
- \vec{B} : champ magnétique
- c : célérité (m/s)
- λ : longueur d'onde (m)
- T : période = λ / c (s)
- f : fréquence = $1 / T$ (Hz)


- Les équipements connectés sont munis d'antennes capables d'émettre et de recevoir des ondes avec des techniques de modulation avancées.

Antenne PC



Antenne iPhone 4





UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

2

Généralités

Les liaisons radio : le spectre

- Différentes catégories d'onde suivant la fréquence : ondes radio, infra-rouge, visible, ultra-violet, rayons X, γ
- Les transmissions 2G/3G/4G et WLAN sont limités à la zone des HF et des micro-ondes.

The diagram illustrates the electromagnetic spectrum with various applications categorized by frequency range:

- 0 Hz to 1 Hz:** Lignes de puissance électriques
- 1 Hz to 100 kHz:** Ecrans de terminaux
- 100 kHz to 1 MHz:** Fours à induction
- 1 MHz to 100 MHz:** Radio AM
- 100 MHz to 1 GHz:** VHF / TV, Radios FM, BSM-RMN, Chauffage domestique
- 1 GHz to 100 GHz:** UHF / TV, Téléphones cellulaires
- 100 GHz to 10¹³ Hz:** Fours à micro-onde, Radars, Satellites, Fours industriels à micro-ondes
- 10¹³ Hz to 10¹⁴ Hz:** Appareils de chauffage
- 10¹⁴ Hz to 10¹⁵ Hz:** Lampes à bronzage, Lasers, Soudage à l'arc
- 10¹⁵ Hz to 10²¹ Hz:** Gammatron

The spectrum is divided into several regions:

- Basses fréquences:** 0 Hz to 100 kHz
- Fréquences radio:** 100 kHz to 100 MHz
- Hautes fréquences:** 100 MHz to 1 GHz
- Micro-ondes:** 1 GHz to 100 GHz
- Infra-rouge:** 100 GHz to 10¹⁴ Hz
- Visible:** 10¹⁴ Hz to 10¹⁵ Hz
- Ultra-violet:** 10¹⁵ Hz to 10¹⁶ Hz
- Rayonnements X et Gamma:** 10¹⁶ Hz to 10²¹ Hz

Two red arrows indicate the nature of the radiation:

- Rayonnements non-ionisants:** From 0 Hz to 10¹⁵ Hz
- Rayonnements ionisants:** From 10¹⁵ Hz to 10²¹ Hz

Key frequency markers and standards are highlighted at the bottom:

- 800+1800+1900(US)MHz: 2G Tribande
- 2.1 GHz: 3G
- 2.4 GHz: WIFI
- 0.8+2.6 GHz: 4G
- ZigBee
- Bluetooth

Source: UMLV-M2 Réseaux sans fil S. Lohier

Généralités

Les liaisons radio : le spectre

- ❑ Questions
 - A quoi correspondent les micro-ondes ?
 - Quelles sont leurs longueurs d'onde ?
 - Quelles sont les longueurs d'onde correspondant aux transmissions WiFi ?
 - A partir de quelle puissance les micro-ondes sont-elles dangereuses ?
 - Existe-t-il des limites définies en matière d'exposition du corps humain aux ondes radio ?

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

4

Généralités Exposition aux ondes radio

Notice de téléphone - le DAS

Informations et précautions d'usage

DAS

CE MODELE DE TÉLÉPHONE EST CONFORME AUX EXIGENCES INTERNATIONALES EN MATIÈRE D'EXPOSITION AUX ONDES RADIO

Votre téléphone est un émetteur/récepteur. Il a été conçu pour respecter les limites d'exposition aux ondes radio recommandées internationalement. Ces limites ont été déterminées par l'organisme scientifique indépendant ICNIRP et comprennent une marge de sécurité destinée à assurer la protection de tous, quel que soit l'âge et l'état de santé.

Les limites utilisent une unité de mesure appelée Débit d'Absorption Spécifique, ou DAS (en anglais SAR "Specific Absorption Rate"). La limite de DAS pour les téléphones mobiles est 2 W/kg, et la plus haute valeur mesurée pour ce modèle lors du test à l'oreille est de 1,25W/kg. Les téléphones offrant toute une gamme de fonctions, peuvent être utilisés dans d'autres positions, comme portés au corps comme décrit dans ce livret d'utilisation.

Le DAS est mesuré à la puissance d'émission maximale. Le DAS réel de ce téléphone en utilisation est typiquement plus faible. Ceci est dû aux changements automatiques de puissance du téléphone pour faire en sorte d'utiliser le niveau minimum nécessaire pour assurer sa communication avec le réseau.

L'Organisation Mondiale de la Santé a indiqué que l'information scientifique actuelle n'indique pas le besoin de précautions particulières pour l'utilisation des téléphones mobiles. Elle note que si vous souhaitez réduire votre exposition, vous pouvez limiter la durée des appels, utiliser un dispositif "mains libres" pour éloigner le téléphone de votre tête ou de votre corps.

Des informations complémentaires peuvent être obtenues sur le site de l'[Organisation Mondiale de la Santé](#).

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

5

Généralités Les liaisons radio : avantages/inconvénients

- ☺ Aucun câblage nécessaire.
- ☺ Mobilité intrinsèque.

- ☹ Les transmissions sont sujettes à toutes sorte de perturbations électromagnétiques (obstacle, four à micro-onde...) ce qui limite les performances.
- ☹ Les bandes de fréquence disponibles sont limitées ce qui accroît les risques d'interférences.
- ☹ La puissance du signal diminue avec la distance et la puissance utilisée est sévèrement réglementée par les autorités compétentes des pays.
- ☹ Les atténuations de puissance du signal dues aux effets de masques (*shadowing*) provoqués par les obstacles rencontrés par le signal sur le trajet parcouru entre l'émetteur et le récepteur.
- ☹ Les évanouissements (*fadings*) dans la puissance du signal dus aux nombreux effets induits par le phénomène de multitrajets.
- ☹ Les erreurs de transmission liées aux techniques de modulation complexes.

UMLV-M2

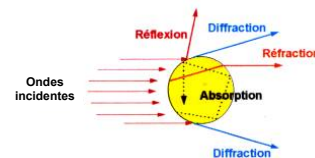
Réseaux sans fil

S. Lohier

6

Généralités Propagation des ondes radio (1)

- Les ondes radio (notées *RF* pour *Radio Frequency*) se propagent en ligne droite dans plusieurs directions.
- La vitesse de propagation des ondes dans le vide est de $3 \cdot 10^8$ m/s.
- Dans tout autre milieu, suivant la nature des milieux rencontrés, les ondes subissent plusieurs phénomènes :
 - la réflexion ;
 - la réfraction ;
 - l'absorption ;
 - la diffraction ;
 - la diffusion.



- Lorsqu'une onde radio rencontre un obstacle, une partie de son énergie est absorbée et transformée, une partie continue à se propager de façon atténuée (réfraction, diffusion) et une partie peut éventuellement être réfléchi.
- L'atténuation augmente avec la fréquence ou la distance.
- Lors d'une collision avec un obstacle, la valeur de l'atténuation dépend fortement du matériau composant l'obstacle.
- Généralement les obstacles métalliques provoquent une forte réflexion, tandis que l'eau absorbe le signal.

UMLV-M2

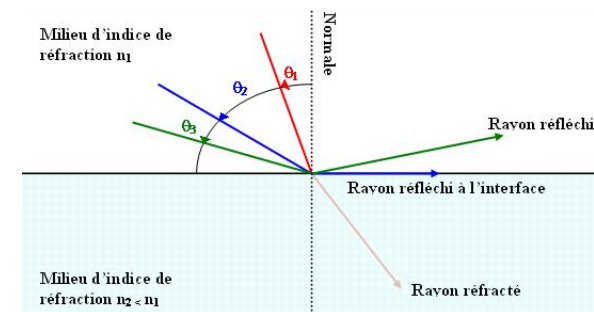
Réseaux sans fil

S. Lohier

7

Généralités Propagation des ondes radio (2)

- Lorsque qu'une onde entre dans un milieu d'indice de réfraction n_1 en dessous d'un certain angle limite (en vert), elle est réfléchié totalement dans ce milieu et ne se propage pas dans le milieu adjacent d'indice n_2 inférieur à n_1 .
- Au delà de cet angle limite (en rouge) le rayon est réfracté avec un changement d'angle par rapport à la normale (lois de Snell-Descartes).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

8

Généralités

Modèles de propagation (1)

- En WiFi, donc pour des fréquences autour de 2,4 GHz plusieurs modèles de propagation existent.
 - Le modèle « Free Space » considère une propagation en ligne de vue (« line-of-sight »). La puissance du signal reçu est fonction de la distance :

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

transmit power
wavelength
received power
gain of transmit and receive antennas

separation distance

- Le modèle « Two Ray Ground » prend en compte une réflexion sur le sol.

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G_R \times G_T}{L} \left(\frac{h_T \times h_R}{R^2} \right)^2$$

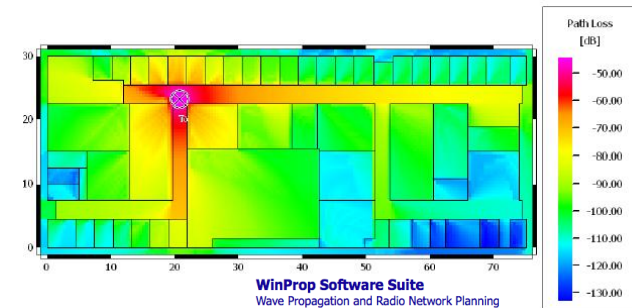
- Le modèle « shadowing » prend en compte le *fading* et le *shadowing*.

$$PL_{d_0 \rightarrow d}(dB) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \chi \quad d_f \leq d_0 \leq d$$

Généralités

Modèles de propagation (2)

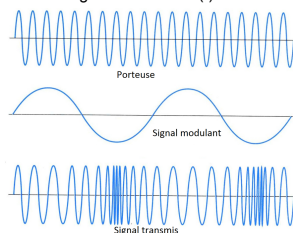
- Exemple de simulation logicielle de l'atténuation WiFi dans un bâtiment.



Généralités

Modulation : principe

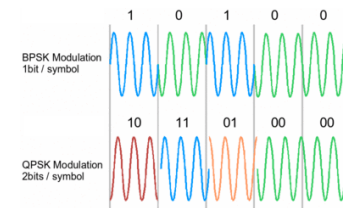
- La modulation est une opération spectrale dont le but est d'adapter le spectre d'un signal au support de transmission.
- L'opération de modulation utilise deux signaux :
 - Le signal portant l'information à transmettre, appelé **signal modulant** : $m(t)$. Il peut être analogique ou numérique (numérique pour des données binaires...)
 - Le signal porteur, aussi appelé « **porteuse** » : $p(t) = A \times \sin(2\pi f t + \phi)$.
 - La porteuse doit être située dans la bande de fréquence allouée (par ex. 2,4 à 2,483 GHz en WiFi).
- Moduler la porteuse consiste à faire varier en fonction du signal modulant $m(t)$ une ou plusieurs caractéristiques de la porteuse $p(t)$:
 - l'amplitude $A \rightarrow$ modulation d'amplitude ;
 - la fréquence $F \rightarrow$ modulation de fréquence ;
 - la phase $\phi \rightarrow$ modulation de phase ;
 - l'amplitude A et la phase $\phi \rightarrow$ modulation d'amplitude et de phase.



Généralités

Modulation : débit et valence

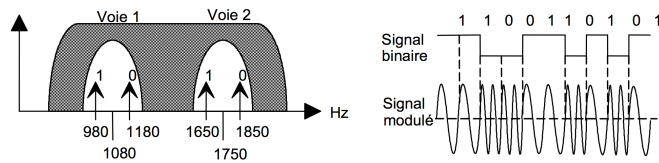
- Le débit de symbole D_s est exprimé en **bauds**. 1 baud correspond à 1 symbole/s.
- Dans une modulation à M états ou M symboles, M est appelé la **valence** de la modulation.
- Le débit de symboles et le débit binaire sont liés par la relation : $D_b = \log_2(M) \times D_s$.
- Exemples :
 - Avec une modulation binaire présente deux symboles : un pour le bit 0 et un pour le bit 1. Le débit binaire est égal au débit de symbole : $D_b = D_s$.
 - Avec 4 symboles et 2 bits par symbole, le débit binaire est le double du débit de symbole : $D_b = \log_2(4) \times D_s = 2 D_s$



Généralités

Modulation FSK

- Pour transporter un signal binaire, la modulation la plus simple est la modulation par saut de fréquence ou **FSK** (*Frequency Shift Keying*).
- Une porteuse sinusoïdale dont la fréquence F_0 est modulée par deux valeurs opposées de fréquences ($+f_1$ et $-f_1$) permet la représentation des deux niveaux logiques.
- Pour permettre une liaison full duplex sur un même support physique, on utilise la technique du partage de bande : une voie correspondant à une bande de fréquence ($F_0 - f_1$; $F_0 + f_1$) servira à l'émission, une autre voie correspondant à une autre bande ($F_0 - f_2$; $F_0 + f_2$) servira à la réception.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

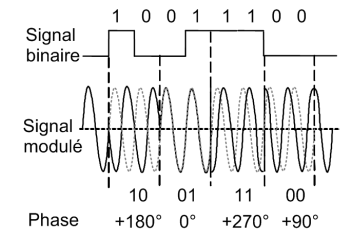
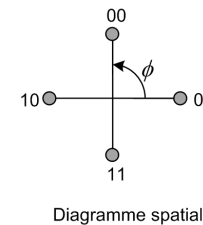
S. Lohier

13

Généralités

Modulation PSK

- La plus efficace est la modulation par saut de phase ou **PSK** (*Phase Shift Keying*).
- Elle associe à un code binaire une valeur de la phase Φ de la porteuse sinusoïdale $V \sin(\omega t + \Phi)$.
- En utilisant des codes binaires de 2, 3 bits ou plus, on peut augmenter le débit binaire sans augmenter le débit des symboles (la fréquence de modulation).
- Exemple de modulation **PSK** avec des sauts de phase de $\pi/2$ et 2 bits par état de phase.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

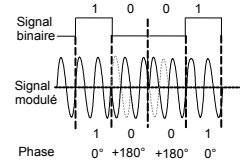
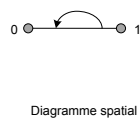
S. Lohier

14

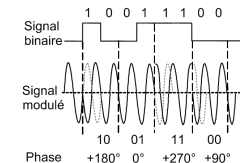
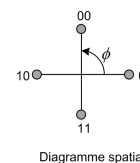
Généralités

Modulations PSK

- La démodulation est plus simple lorsque le saut de phase est référencé par rapport l'état précédent et non par rapport à une phase nulle initiale. Il s'agit alors d'une modulation différentielle **DPSK** (*Differential Phase Shift Keying*).
- Exemple de modulation binaire **DBPSK** (*Differential Binary Phase Shift Keying*) avec un bit par intervalle.



- Exemple de modulation de phase différentielle de porteuses en quadrature (sauts de $\pi/2$, deux bits par intervalle) **DQPSK** (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

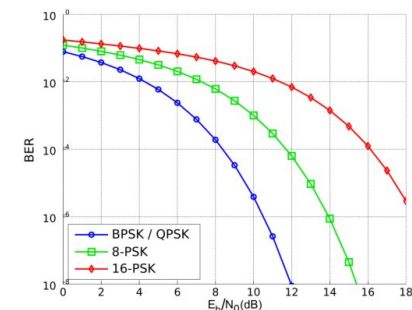
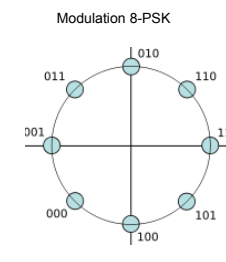
S. Lohier

15

Généralités

Modulations PSK

- En diminuant les valeurs de sauts de phase, on multiplie le nombre de bits par état de phase et donc le débit.
- Mais le taux d'erreur par bit (BER: *Bit Error Rate*) est plus important avec les modulations d'ordre élevé pour des rapports Energie / Bruit (E_b/N_0) significatifs.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

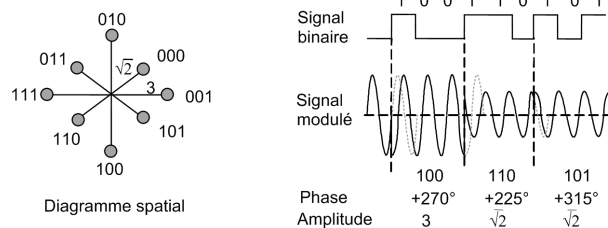
S. Lohier

16

Généralités

Modulation PSK + AM

- En combinant une modulation de phase à une modulation d'amplitude, on obtient une meilleure répartition des points sur le diagramme spatial et donc une meilleure immunité au bruit.
- Dans l'exemple, chacun des huit états de phase est codé sur 3 bits. Deux valeurs d'amplitude (valeurs relatives 3 et $\sqrt{2}$) sont utilisées.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

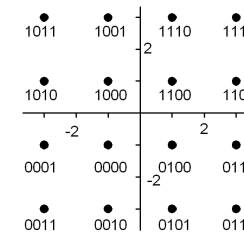
S. Lohier

17

Généralités

Modulation QAM

- La modulation QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) combine les sauts de phase et d'amplitude et permet de coder jusqu'à 4 bits par état.
- De part la proximité des points sur le diagramme spatial, elle est fortement dépendant de la qualité des lignes utilisées.
- Exemple de modulation QAM 16.
Pour chacun des groupes de 4 bits, les deux bits de poids faibles sont codés de façon différentielle en fonction de la combinaison précédente.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

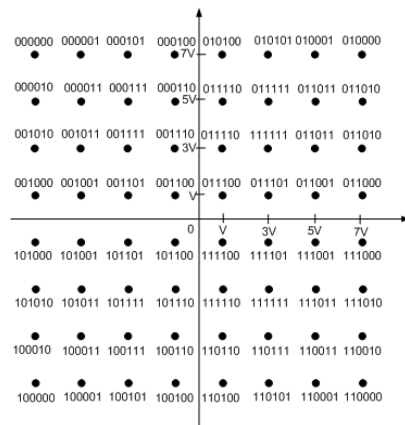
S. Lohier

18

Généralités

Modulation QAM

- Exemple de modulation QAM 64



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

19

Généralités

Modulation QAM

- La modulation QAM est très utilisée.
- En pratique, on exploite des valences allant de M=4 à M=256.
- Parmi les applications utilisant la modulation QAM :
 - Les modems V90 et V92 dans le sens montant pour les connexions à Internet via le RTC (modulation 16-QAM et 64-QAM) ;
 - La télévision numérique terrestre (TNT) sur les sous-porteuses OFDM : 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM pour la 1^{ère} norme (DVB-T), tandis que la 2^{ème} norme (DVB-T2) utilise aussi la 256-QAM.
 - Le Wi-Fi sur les sous-porteuses de l'OFDM dans les normes IEEE 802.11a (16-QAM pour les débits de 24 et 36 Mbit/s, 64-QAM pour les débits de 48 et 54 Mbit/s) et IEEE 802.11n (16-QAM pour les débits de 54 et 81 Mbit/s, 64-QAM pour les débits de 108, 121,5 et 135 Mbit/s).

UMLV-M2

Réseaux sans fil

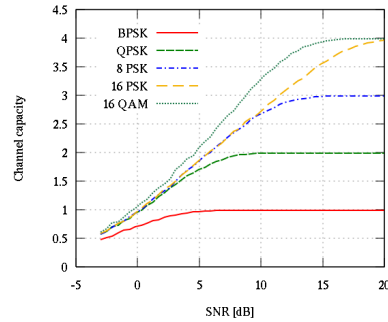
S. Lohier

20

Généralités

Efficacité des modulations PSK

- Pour toutes les modulations d'ordre M avec $M = 2^b$ symboles, pour un accès exclusif à une bande passante donnée, la capacité du canal augmente jusqu'à un maximum de b bits/intervalle quand le rapport Signal / Bruit (SNR) augmente.



- Pour améliorer encore la différenciation entre les états, des codages et des techniques à étalement de spectres sont introduits (voir 802.11).

UMLV-M2

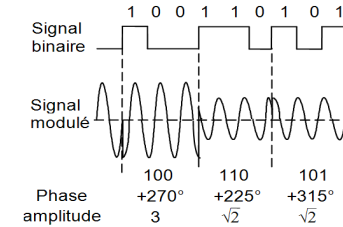
Réseaux sans fil

S. Lohier

21

Questions sur les modulations

- La figure suivant représente une séquence binaire et l'allure du signal modulé correspondant.



- De quel type de modulation s'agit-il ? Justifiez votre réponse.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

22

Questions sur les modulations

- Etablir le diagramme spatial correspondant.

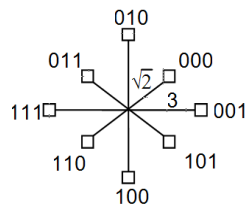


Diagramme spatial

- Quel est le débit si la durée d'un intervalle de modulation est de $1,5\mu s$?

UMLV-M2

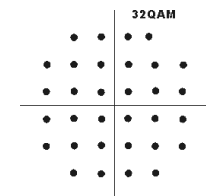
Réseaux sans fil

S. Lohier

23

Questions sur les modulations

- Une modulation 32 QAM est décrite par la constellation ci-dessous. Quel est le type de modulation ?



- Quel est le nombre de symboles ?
- Quelle est la valence ?
- Quel est le nombre de bits par symbole ?
- Quel est le débit binaire si le débit de symboles est de 2 Méga-symboles/s ?

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

24

Généralités

Multiplexage OFDM

- L'OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) est une technique de multiplexage par répartition en fréquences orthogonales.
- L'OFDM limite les interférences inter-symboles et est particulièrement bien adapté aux transmissions mobiles à haut débit et longues distances.
- L'OFDM est utilisé dans :
 - La radiodiffusion pour la télévision numérique terrestre (DVB-T, DVB-H) et la radio numérique terrestre régionale DAB et mondiale DR.M ;
 - Les réseaux sans-fils basé sur les normes 802.11a, 802.11g (Wifi), 802.16 (Wimax) et HiperLAN ;
 - Les réseaux mobiles de nouvelle génération (4G) ;
 - Les liaisons filaires: ADSL, VDSL, modem sur courant porteur (Homeplug), modem câble (Standard Docsis).

UMLV-M2

Réseaux sans fil

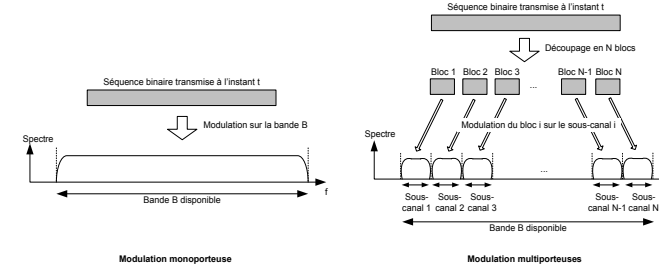
S. Lohier

25

Généralités

Principe OFDM

- Le principe de l'OFDM consiste à répartir sur un grand nombre de porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre : transmission « multi-porteuses » :
- La bande de fréquences disponible pour l'émission est découpée en N sous-bandes étroites ;
- La séquence binaire est partagée en N blocs qui modulent chacun l'une des N sous-porteuses et sont transmis simultanément.
- Si le débit de symboles sur une sous-porteuse vaut D_s , le débit de symbole total est $N \times D_s$.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

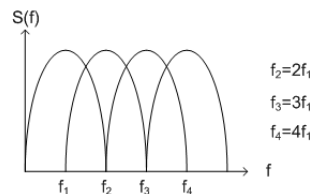
S. Lohier

26

Généralités

Principe OFDM

- Pour que le signal modulé ait une grande efficacité spectrale (optimisation de la bande allouée), il faut que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles, tout en garantissant que le récepteur soit capable de les séparer et de retrouver le symbole numérique émis sur chacune d'entre elles.
- Ceci est vérifié avec des porteuses orthogonales : le spectre d'une porteuse est nul aux fréquences des autres porteuses.



- Pour améliorer la fiabilité, le signal à transmettre est généralement répété sur plusieurs porteuses.
- Chaque porteuse est ensuite modulée indépendamment en utilisant des modulations classiques : QPSK, QAM-16, QAM-64...

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

27

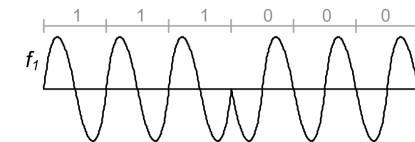
Généralités

OFDM : un exemple simple

- Soit le signal binaire à transmettre : 1100 1110 1000 0100 0110 0011...
- Le signal est multiplexé sur 4 porteuses orthogonales :

	f_1	f_2	f_3	f_4
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
0	1	1	0	0
0	0	1	1	1

- Chaque porteuse doit transmettre sa propre séquence.
- Le signal de porteuse f_1 sera ainsi modulé par la séquence 111000.
- Signal modulé avec une modulation simple BPSK :



UMLV-M2

Réseaux sans fil

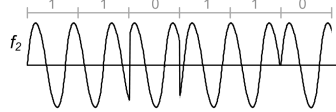
S. Lohier

28

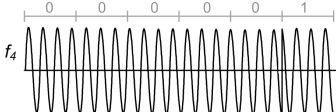
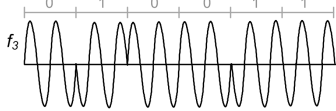
Généralités

OFDM : un exemple simple

- Le signal de porteuse f_2 , qui est la fréquence orthogonale suivante, sera modulé par la séquence 110110.



- Les signaux de porteuse f_3 et f_4 seront modulés par les séquences respectives 010011 et 000001.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

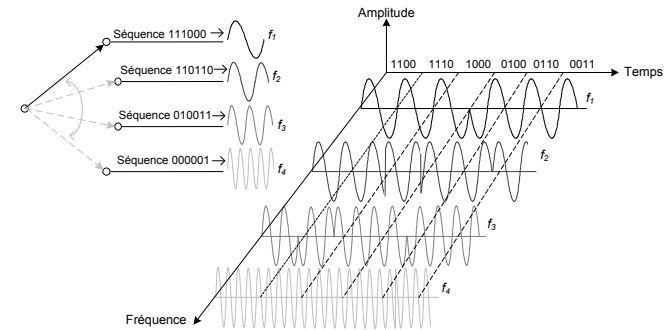
S. Lohier

29

Généralités

OFDM : un exemple simple

- Les bits successifs du signal binaire à transmettre sont donc multiplexés dans le temps pour moduler les différentes sous-porteuses orthogonales qui seront transmises simultanément.
- Dans cet exemple simple, un bit seulement est transmis par état de phase pour chaque sous-porteuse grâce à une modulation BPSK. Dans la réalité, les modulations utilisées en OFDM sont beaucoup plus performantes (8PSK, QAM 16...).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

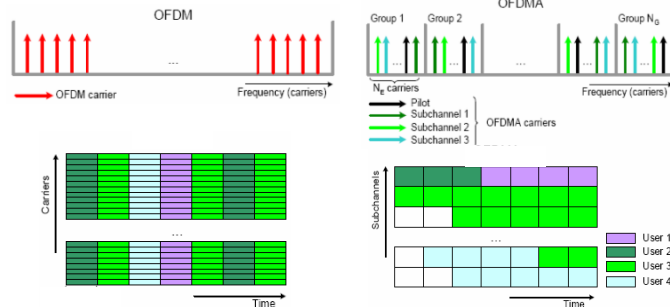
S. Lohier

30

Généralités

Multiplexage OFDMA

- Le multiplexage OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) rajoute à l'OFDM un accès multiple pour une exploitation multi-utilisateurs :
 - la bande est découpée en N_G groupes (*groups*) de N_c sous-porteuses (*subcarriers*) ;
 - un sous-canal (*subchannel*) est un ensemble de sous-porteuses prises dans chaque groupe ;
 - un utilisateur utilise un ou plusieurs sous-canaux par intervalle de temps.
- OFDMA peut être vu comme une combinaison des multiplexages FDMA (fréquence) et TDMA (temps).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

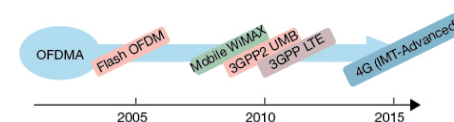
S. Lohier

31

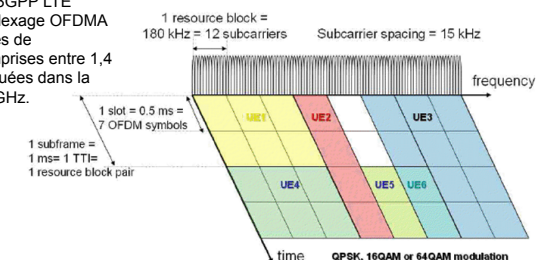
Généralités

Exemples OFDMA

- OFDMA est considérée comme la technologie clé pour les prochaines générations du WiMAX et du téléphone cellulaire.



- La technologie 3GPP LTE utilise un multiplexage OFDMA dans des bandes de fréquences comprises entre 1,4 et 20 MHz et situées dans la bande des 2,6 GHz.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

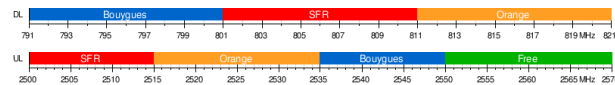
S. Lohier

32

Questions sur le multiplexage OFDMA

Questions :

- Une trame LTE dure 10 ms. Elle est découpée en 10 sous trames de 1 ms. Chaque sous trame est divisée en deux slots de 0,5 ms. 7 symboles sont transmis dans un slot et un slot correspond à 12 sous-porteuses OFDMA. Quel est le débit de symbole pour un bloc ?
- Quel est le débit binaire par bloc si une modulation 64QAM est utilisée pour chaque sous-porteuse ?
- La figure suivante donne les bandes attribuées aux opérateurs français pour le LTE. Quels sont les débits maximum possibles dans la bande des 2,6 GHz pour les différents opérateurs si 25 blocs peuvent être exploités par bande de 5 Mhz ?



UMLV-M2

Réseaux sans fil

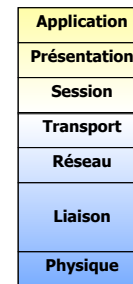
S. Lohier

33

Généralités

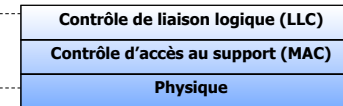
L'accès au support radio

- L'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) propose un modèle d'architecture pour les couches 1 et 2 du modèle OSI.



Modèle OSI

- Sous-couche MAC (Medium Access Control)**
 - Rôle : assurer le partage du support entre tous les utilisateurs.
 - Gestion des adresses physiques (adresses MAC).
- Sous-couche LLC (Logical Link Control)**
 - Rôle : gestion des communications, liaisons logiques entre stations, contrôle de flux.
 - Interface avec les couches supérieures.



Modèle IEEE

UMLV-M2

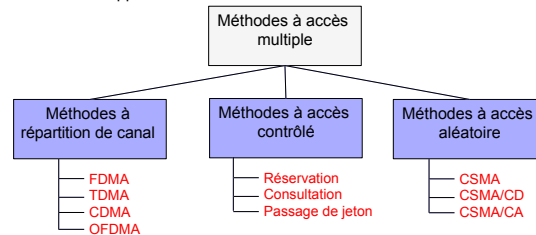
Réseaux sans fil

S. Lohier

34

Généralités Pourquoi une méthode d'accès ?

- Plusieurs machines se partagent un même canal : il faut définir une méthode régissant les accès multiples à ce canal. C'est le rôle de la **couche MAC**.
- Il existe différentes méthodes, plus ou moins **équitables** vis à vis des possibilités d'accès au support :



- D'autres classifications existent suivant le caractère **statique** ou **dynamique** de l'allocation ou encore en distinguant accès par **consultation** et accès par **compétition**.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

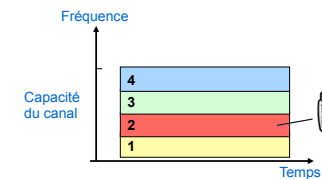
S. Lohier

35

Généralités

Multiplexage FDMA

- Les **méthodes à répartition de canal** sont la plupart du temps statiques : la bande passante est répartie temporellement ou fréquemment entre les stations pour toute la session.
- La première méthode de ce type est l'Accès Multiple à Répartition en Fréquence (AMRF) ou **FDMA (Frequency Division Multiple Access)**.
- Une bande de fréquence est attribuée à une station pour toute la communication.
- Le débit est fonction de la largeur de la bande allouée et de la qualité de la ligne.
- Exemple : la téléphonie mobile, GSM.



- ⊗ Perte de la bande passante quand une station n'émet pas.
- ⊗ Les bandes de garde sont perdues.
- ⊗ Nécessite des filtres efficaces entre les canaux.

UMLV-M2

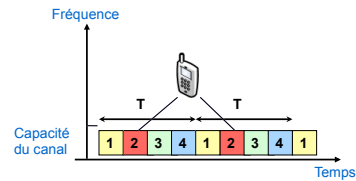
Réseaux sans fil

S. Lohier

36

Généralités Multiplexage TDMA

- La deuxième méthode est l'Accès Multiple à Répartition dans le Temps (AMRT) ou **TDMA** (Time Division Multiple Access).
- Une tranche (slot) de temps est attribuée pour chaque période à une station.
- Le débit est fonction de la période et du nombre d'octets que la station peut placer dans sa tranche.
- Exemple : téléphonie mobile, Bluetooth



- Mal adapté aux réseaux locaux où le retrait/ajout de stations est fréquent ce qui nécessite de redéfinir la trame fréquemment (contrainte statique).
- Tout slot laissé libre par une station ne peut être utilisé par les autres stations

UMLV-M2

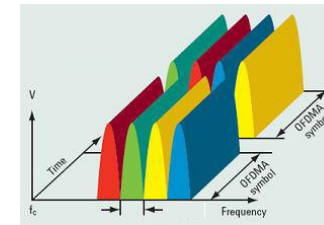
Réseaux sans fil

S. Lohier

37

Généralités Multiplexage OFDMA

- L'**OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) peut être vue comme une variante de FDMA.
- Le canal global est découpé en sous-canaux et les stations utilisent plusieurs porteuses réparties dans différents sous-canaux.
- Dans ce cas particulier, l'accès est **dynamique** car le nombre de porteuses utilisées peut varier dans le temps : redistribution à chaque slot de temps.
- On peut donc considérer que OFDMA combine FDMA et TDMA.
- Exemples : WiFi, UMTS, TNT...



UMLV-M2

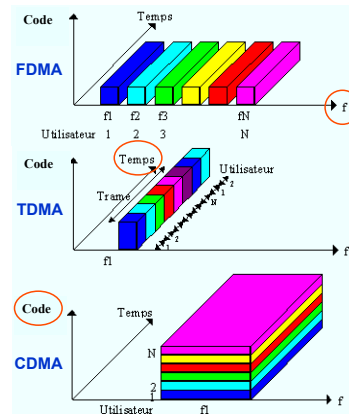
Réseaux sans fil

S. Lohier

38

Généralités Multiplexage CDMA

- Le multiplexage **CDMA** (Code Division Multiplexing Access) est basé sur la différenciation par code.
- Un code binaire N est affecté à chaque utilisateur, ce code N est orthogonal aux codes liés aux autres utilisateurs.
- Tous les utilisateurs d'une même cellule disposent donc simultanément de la totalité de la bande de fréquence.
- En pratique, les codes étant seulement quasi orthogonaux à la réception, il existe un problème d'auto interférence.
- Le **CDMA** est notamment utilisé dans la téléphonie mobile et concurrence le GSM et l'UMTS (Qualcomm).



UMLV-M2

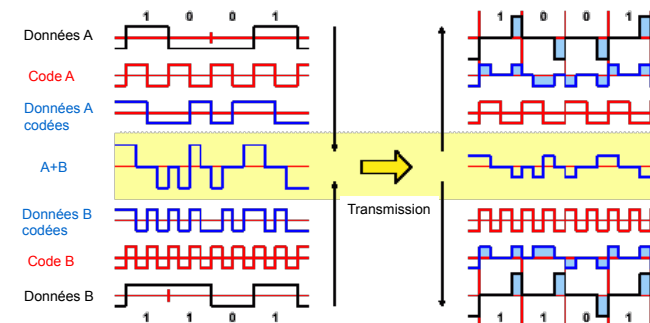
Réseaux sans fil

S. Lohier

39

Généralités Exemple de multiplexage CDMA

- Un XOR est utilisé pour coder les données de A et B.
- A la réception, un filtre passe-bas est appliqué sur les signaux décodés.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

40

Questions sur les multiplexages

Expliquez les principes de base des trois techniques de multiplexage utilisées dans les transmissions sans fil (TDMA, FDMA et OFDM).
Donnez un exemple pour chacune.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

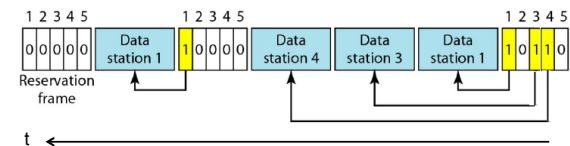
S. Lohier

41

Généralités

Contrôle par réservation

- Les méthodes à accès contrôlé sont caractérisées par une allocation **dynamique**, à la demande, de la bande passante.
- Ces méthodes sont souvent considérées comme **déterministes** car si l'on connaît la séquence d'accès des stations et éventuellement leurs priorités, il est possible de prévoir les temps d'attente et de transmission pour chaque station.
- Dans le contrôle centralisé par **réservation**, une trame spécifique (*reservation frame*) est utilisée avant le début des transmissions de données pour que les stations esclaves puissent effectuer une réservation vers le maître.
- Dans l'exemple, les stations 1, 3 et 4 (cinq stations en tout) effectuent une réservation dans le 1^{er} intervalle ; seule la station 1 transmet des données dans le 2^{ème} intervalle.
- Exemple : ZigBee



UMLV-M2

Réseaux sans fil

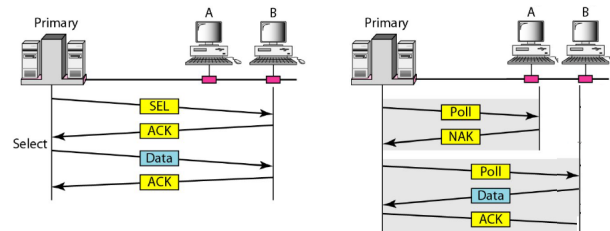
S. Lohier

42

Généralités

Contrôle par consultation

- Principe du contrôle centralisé par **consultation** ou **scrutation** (*polling*) :
 - une station primaire (maître) gère l'accès au support ;
 - elle sollicite les stations secondaires (esclaves) concernées pour envoyer ses propres données ;
 - elle invite les esclaves à émettre en leur envoyant une proposition (*poll*) selon un ordre établi dans une table de scrutation ;
 - le maître peut être défini une fois pour toute (contrôle centralisé) ou chaque esclave peut devenir maître à un instant donné (contrôle distribué).
- Exemple : Bluetooth, GPRS.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

43

Généralités

Méthodes d'accès aléatoire

- Les stations peuvent transmettre à tout moment mais avec des risques de collisions (plusieurs trames peuvent se superposer sur le support partagé).
 - Le protocole **CSMA** (*Carrier Sense Multiple Access*) limite le risque de collision :
 - une station désirent émettre commence par « écouter » le support pour détecter une transmission en cours (*Carrier Sense*) ;
 - la station transmet sa trame dès qu'elle ne détecte plus de signaux sur le support.
 - Plusieurs variantes :
 - CSMA/CD** en filaire : si malgré l'écoute du support, une collision intervient, les stations sont capables de la détecter (*Collision Detection*) et de relancer une transmission après un temps d'attente aléatoire ;
 - CSMA/CA** en sans fil : lorsqu'elle détecte un support libre, la station anticipe et commence par attendre un temps aléatoire pour éviter les collisions (*Collision Avoidance*) ;
- Méthode utilisée dans les transmissions radio pour lesquelles une station en émission ne peut pas détecter une collision (émission et réception simultanées impossibles).

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

44

Généralités

Accès et couche MAC

- ❑ Questions :
 - Quel est le rôle de la sous-couche MAC ? Quel est le nom de l'unité de données de niveau 2 ? Pourquoi cette sous-couche est-elle indispensable ?

- Trente stations sont connectées sur un LAN avec un support physique en paires torsadées. On estime à 50% le taux moyen de stations désirant émettre à un instant donné. Quelle est la méthode d'accès la plus efficace dans ce cas ?

Généralités

Classification des réseaux sans fil

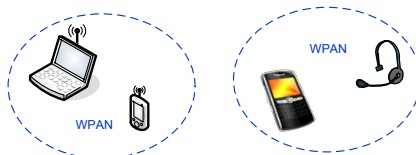
- ❑ 1896 première application sans fil : le télégraphe sans fil.
- ❑ 1960 : premier satellite télécom transportant 240 canaux de voix différents.
- ❑ 1970 : TV couleur, toute la TV aujourd'hui ou presque passe par satellite.
- ❑ 1996 : téléphonie cellulaire GSM en France
- ❑ 2000 : technologies WiFi
- ❑ 2005 : téléphonie 3G
- ❑ 2011 : téléphonie 4G

- ❑ Aujourd'hui, 4 catégories de réseaux sans fil :
 - **WPAN** : Wireless Personal Area Network ;
 - **WLAN** : Wireless Local Area Network ;
 - **WMAN** : Wireless Metropolitan Area Network ;
 - **WWAN** : Wireless Wide Area Network ;

Généralités

Les réseaux personnels WPAN

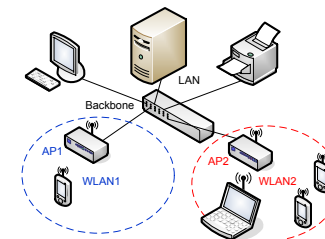
- ❑ Les WPAN (*Wireless Personal Area Network*) fournissent une connectivité sans infrastructure dédiée sur de très courtes distances.
- ❑ Ils sont généralement en point-à-point avec deux éléments connectés.
- ❑ Les applications et les technologies des WPAN sont très variées :
 - connexion PC/clavier en infrarouge ;
 - connexion smartphone/PC portable en Bluetooth ;
 - connexion écouteur/smartphone en Bluetooth....



Généralités

Les réseaux locaux WLAN

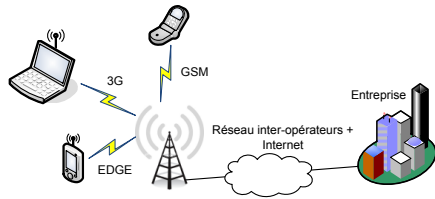
- ❑ Le WLAN (*Wireless Local Area Network*) est comparable au réseau câble de type LAN.
- ❑ Il est constitué de points d'accès (AP) formant une zone de couverture radio.
- ❑ Les terminaux mobiles se déplacent dans la zone de couverture et restent en principe connectés en permanence au réseau de l'entreprise ou à un point de raccordement public (hot spot).
- ❑ Selon leur vocation, les WLAN peuvent être :
 - Des WLAN privés ou d'entreprise (PME, école, hôpital...);
 - Des WAN publics ou hot spots (hotel, aéroport...)
 - Des WLAN domestiques (routeur ADSL Wifi...)



Généralités

Les réseaux de mobiles WWAN

- Les WWAN (*Wireless Wide Area Network*) sont des réseaux sans fil étendus avec des couvertures à l'échelle nationale ou mondiale.
- Ils correspondent généralement à des réseaux de mobiles basés sur des technologies télécoms (GSM, EDGE, UMTS, LTE...).
- 2 catégories :
 - Les WWAN publics mis en œuvre par les opérateurs (téléphonie cellulaire, accès Internet sur mobile 3G...);
 - Les WWAN privés sur infrastructure publique mis en place par les entreprises pour relier leurs terminaux mobiles (accès depuis un smartphone connecté en 3G sur Internet à la messagerie interne de l'entreprise).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

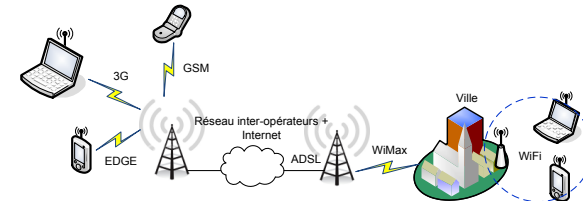
S. Lohier

49

Généralités

Les réseaux d'accès WMAN

- Les WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) sont à la frontière des WLAN et des WWAN.
- Il peuvent être considérés comme un cas particulier des WWAN avec des couvertures réduites à l'échelle d'une ville et des technologies du même type (GSM, GPRS, UMTS, LTE...).
- Il peuvent être considérés comme une extension des WLAN avec des technologies voisines (802.11, 802.16 WiMax...).
- Dans ce dernier cas, le rôle des WMAN peut être de couvrir la zone dite du « dernier kilomètre » pour fournir un accès à Internet haut débit aux zones non couvertes par les technologies filaires classiques.



UMLV-M2

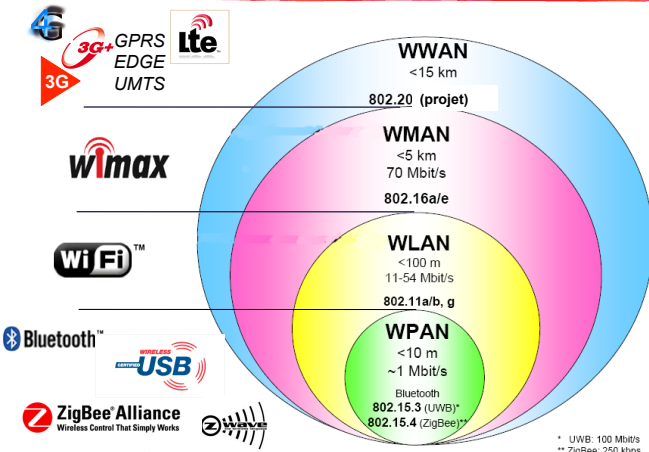
Réseaux sans fil

S. Lohier

50

Généralités

Classification / taille



UMLV-M2

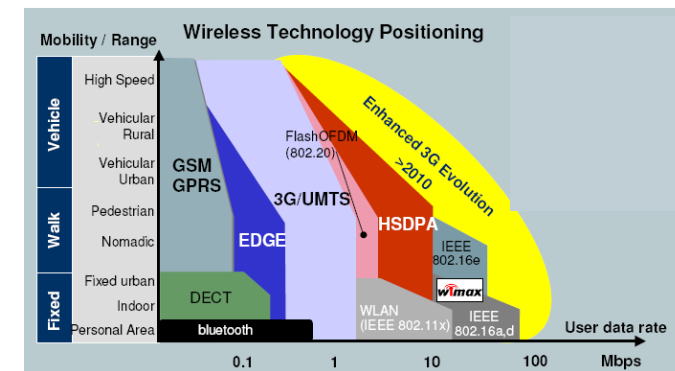
Réseaux sans fil

S. Lohier

51

Généralités

Classification / mobilité et débit



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

52

WLAN Les réseaux WiFi 802.11

- ❑ Système local offrant un moyen de communication direct entre plusieurs ordinateurs portables par liaison radio.
- ❑ Avantages :
 - Mobilité, augmente l'efficacité et la productivité ;
 - Installation dans zones à câbler (immeubles anciens, halls, salles de réunion, cafés, lieux publics...);
 - Temps d'installation réduits ;
 - Facilité d'emploi pour les utilisateurs ;
 - Maintenance facile, coût de câblages faibles ;
 - Réseaux ad-hoc : réunions, interventions militaires et humanitaires.
- ❑ Inconvénients :
 - Transmissions sujettes aux perturbations ;
 - Bandes de fréquences allouées limitées ;
 - Débits liés à la distance ;
 - Difficile à sécuriser (réseau « ouvert »).

UMLV-M2

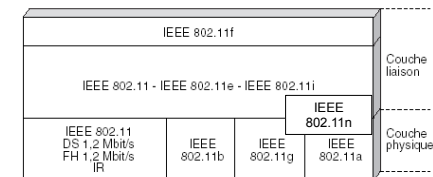
Réseaux sans fil

S. Lohier

53

WLAN La norme IEEE 802.11

- ❑ La norme [IEEE 802.11](#) est un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil.
- ❑ [WiFi](#) (*Wireless Fidelity*) est le nom donnée à la certification délivrée par la [Wi-Fi Alliance](#).
- ❑ Des révisions ont été apportées à la norme originale afin d'optimiser le débit, la sécurité ou l'interopérabilité.
- ❑ Les extensions de la norme IEEE 802.11 utilisent toute le même protocole d'accès au canal : [CSMA/CA](#).
- ❑ Certaines extensions modifient la couche physique, d'autres rajoutent des fonctionnalités au niveau liaison.



UMLV-M2

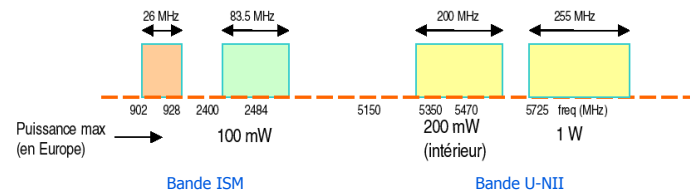
Réseaux sans fil

S. Lohier

54

WLAN Fréquences IEEE 802.11

- ❑ Ces normes IEEE 802.11 utilisent les bandes de fréquence sans licences allouées à travers le monde pour les transmissions sans fil.
 - ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) : bande « des 2.4 GHz » : 83 MHz alloués aux WLAN ;
 - U-NII (*Unlicensed-National Information Infrastructure*) : bande « des 5GHz » : 200 MHz alloués aux WLAN.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

55

WLAN Les principales normes IEEE 802.11

802.11a (WiFi5)	1999	54 Mbps théoriques Bande des 5 GHz Incompatible avec 802.11b, g et n
802.11b (WiFi)	Septembre 1999	11 Mbps théoriques Bande des 2.4GHz
802.11g	Juin 2003	54 Mbps théoriques Bande des 2.4 GHz Compatibilité ascendante avec la norme 802.11b
802.11i	Juin 2004	Améliore la sécurité des transmissions S'appuie sur l'AES (<i>Advanced Encryption Standard</i>) Chiffrement des communications pour les transmissions utilisant les technologies 802.11a, 802.11b et 802.11g.
802.11n	Normalisée en 2010	Evolution rétrocompatible des normes 802.11b/g. Débits de 100 Mbps et plus.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

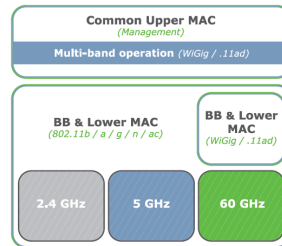
S. Lohier

56

WLAN Nouvelles normes IEEE 802.11

IEEE 802.11ac Gigabit WiFi :

- Groupe IEEE pour le très haut débit ;
- Bande < 6 GHz ;
- Débit entre 500 Mbit/s et 1 Gbit/s ;
- MIMO multi-utilisateurs.



IEEE 802.11ad WiGig :

- Groupe IEEE pour le très haut débit ;
- Bande des 60 GHz ;
- Débit entre 1 et 6 Gbit/s ;
- Portée limitée ;
- Augmentation de la portée directionnelle (beamforming).

UMLV-M2

Réseaux sans fil

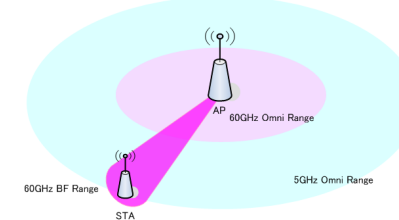
S. Lohier

57

WLAN IEEE 802.11 ad



- ❑ L'utilisation de la bande des 60 GHz permet des transmissions plus rapides mais avec des pertes de propagation plus importantes que dans la bande des 2,4 GHz.
- ❑ La solution adoptée est le "beamforming" adaptatif qui permet des communications multi-gigabit à des distances supérieures à 10 m
- ❑ Le "beamforming" utilise des antennes directionnelles pour réduire les interférences et contraindre le signal entre deux périphériques à l'intérieur d'un "faisceau" (*beam*) concentré.
- ❑ Pendant le processus de "beamforming", les deux périphériques établissent la communication et accordent finement leurs antennes pour améliorer la qualité de la communication directionnelle jusqu'à atteindre un débit suffisant.



UMLV-M2

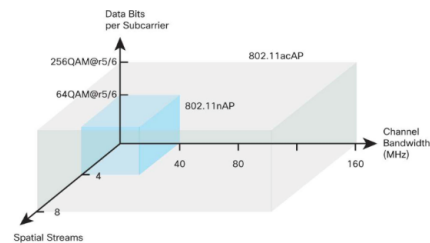
Réseaux sans fil

S. Lohier

58

WLAN IEEE 802.11 ac

- ❑ Trois améliorations permettent l'augmentation des débits par rapport au 802.11n :
 - La largeur de bande (jusqu'à 160 MHz);
 - La densité de modulation (256 QAM) ;
 - L'amélioration du MIMO (jusqu'à 8 flux).
- ❑ Beaucoup d'appareils récents permettent des transmissions 802.11ac (Samsung galaxy S4, iphone 6, macbook air, Freebox 6 Revolution...)



UMLV-M2

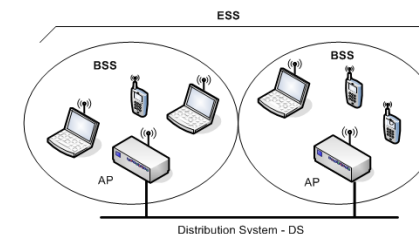
Réseaux sans fil

S. Lohier

59

WLAN Les 2 modes de connexion 802.11

- ❑ **Mode infrastructure** : des points d'accès sont connectés au réseau local filaire. Chacun définit une cellule.
 - Cellule = BSS (*Basic Service Set*)
 - Les stations sont connectées par l'AP (*Access Point*) : il peut y en avoir un ou plusieurs.
 - Les AP sont interconnectés par le DS (*Distribution System*), par exemple Ethernet.
 - Les BSS connectés en sous-réseau constituent l'ESS (*Extended Service Set*).



UMLV-M2

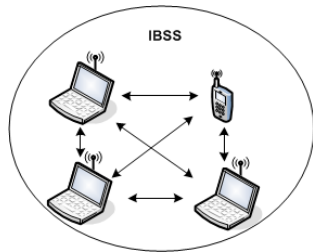
Réseaux sans fil

S. Lohier

60

WLAN Les 2 modes de connexion 802.11 (2)

- ❑ Mode ad hoc : mode sans infrastructure.
- ❑ Réalise un réseau poste à poste : chaque poste peut communiquer avec ses voisins immédiats.
- ❑ Également appelé IBSS (*Independent Basic Service Set*).
- ❑ Attention : le mode ad hoc des réseaux 802.11 ne permet pas de réaliser directement un réseau ad hoc : pour des communications à plusieurs sauts, il est nécessaire de rajouter un protocole de routage ad hoc.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

61

WLAN Les couches 802.11

- ❑ La norme IEEE 802.11 définit les couches MAC et PHY.

Couches OSI	Couches IEEE	Normes
Liaison	LLC (Logical Link Control)	802.2
	MAC (Medium Access Control)	802.11
Physique	PHY (Physical Signalling Layer)	IR FHSS DSSS OFDM

- ❑ 4 couches physiques sont normalisées :
 - IR (infrarouge) ;
 - FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) ;
 - DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) ;
 - OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).
- ❑ La couche MAC 802.11 offre des fonctionnalités supplémentaires : fragmentation, acquittement, retransmission.

UMLV-M2

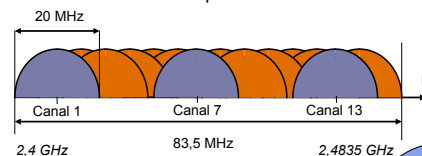
Réseaux sans fil

S. Lohier

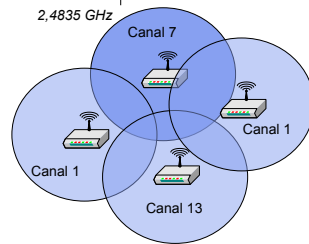
62

WLAN Couche ϕ 802.11

- ❑ La bande ISM de 83MHz est divisée en 14 sous canaux de 20 MHz.
- ❑ La transmission ne se fait que sur un seul canal.



- ❑ Pour éviter les recouvrements, un espace ne peut être couvert que par 3 canaux disjoints au maximum (par exemple canaux 1, 7 et 13).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

63

WLAN Couche ϕ 802.11b : codages et modulations

Débit en b/s	Nb bits codés par symbole	Longueur du symbole	Débit en symboles /s	Modulation
1 Mb/s	1 bit	11 bits code Barker	1 Méga symboles /s	DBPSK
2 Mb/s	2 bits	11 bits code Barker	1 Méga symboles /s	DQPSK
5,5 Mb/s	4 bits	8 signaux code CCK5,5	1,375 Méga symboles /s	DQPSK
11 Mb/s	8 bits	8 signaux code CCK11	1,375 Méga symboles /s	DQPSK

- ❑ DPSK : Differential Phase Shift Keying
- ❑ DBPSK : Differential Binary Phase Shift Keying
- ❑ QPSK : Quadrature Phase Shift Keying
- ❑ DQPSK : Differential Quadrature Phase Shift Keying
- ❑ CCK : Complementary Code Keying

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

64

WLAN Couche ϕ 802.11g

- ❑ 802.11g (2003) :
 - distances de 40 m à 140 m pour des débits de 6 à 54 Mb/s ;
 - adaptation du débit aux conditions de transmission.
- ❑ Héritage 802.11a (2001) :
 - Utilisation de la solution OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) avec les mêmes modulations (DBPSK, QPSK et QAM).
 - Débits repris en 802.11g DSSS-OFDM: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mb/s
- ❑ Compatibilité 802.11b (1999) :
 - Utilisation de la bande ISM 2,4 à 2,4835 Ghz.
 - Utilisation des standards 802.11b DSSS : 1, 2 ; DSSS-CCK: 5.5, 11 Mb/s

UMLV-M2

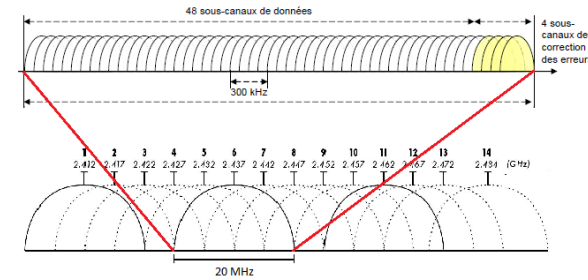
Réseaux sans fil

S. Lohier

65

WLAN Couche ϕ 802.11g : canaux OFDM

- ❑ 48 sous-canaux de données (et de redondances).
- ❑ Données codées à l'émission au moyen d'un code correcteur d'erreurs.
- ❑ Selon les débits $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$ des canaux sont utilisés pour la redondance de données.
- ❑ 4 sous-canaux servant à la transmission de porteuses « pilotes » :
 - Emission de séquences de données fixes ;
 - Utilisées pour évaluer les délais de propagation et les interférences de symboles.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

66

WLAN Couche ϕ 802.11g : modulations OFDM

Débit binaire	Débit par sous canal	Bits codés par symb	Débit en M symboles /s	Code (FEC)	Modulation
6 Mb/s	0,125 Mb/s	1 bit	12 Ms/s	24/48	BPSK
9 Mb/s	0,1875 Mb/s	1 bit	12 Ms/s	36/48	BPSK
12 Mb/s	0,25 Mb/s	2 bits	12 Ms/s	48/96	QPSK
18 Mb/s	0,375 Mb/s	2 bits	12 Ms/s	72/96	QPSK
24 Mb/s	0,5 Mb/s	4 bits	12 Ms/s	96/192	16-QAM
36 Mb/s	0,75 Mb/s	4 bits	12 Ms/s	144/192	16-QAM
48 Mb/s	1 Mb/s	6 bits	12 Ms/s	192/288	64-QAM
54 Mb/s	1,125 Mb/s	6 bits	12 Ms/s	216/288	64-QAM

FEC : Forward Error Correction

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

UMLV-M2

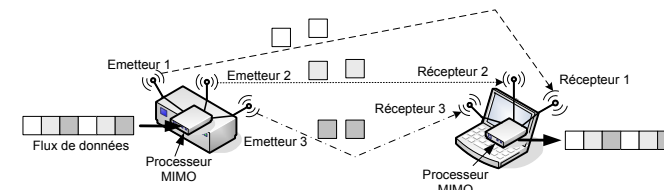
Réseaux sans fil

S. Lohier

67

WLAN MIMO et 802.11n : principe

- ❑ Principe de base de la technique MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) :
 - Utiliser plusieurs antennes sur le même canal pour transmettre davantage de données à la fois.
 - Le flux à transmettre est scindé en plusieurs sous-flux suivant un multiplexage OFDM, chacun transmis par une antenne, aux mêmes fréquences.
 - Pour différencier les sous-flux à la réception et reconstituer le flux initial, la technique MIMO exploite la différence des temps de propagation des signaux.
 - En fonction de l'orientation de chaque antenne, la propagation sera différente suivant la réflexion des signaux sur les murs, le sol, le plafond, les meubles...
- ❑ La norme 802.11n exploite la technologie MIMO.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

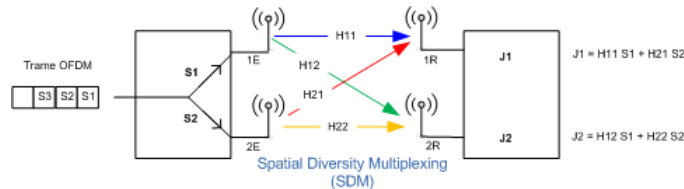
68

WLAN

Couche ϕ 802.11n : SDM

Le multiplexage à diversité spatiale (SDM) pour les débits.

- Avec deux antennes à l'émission et à la réception, quatre canaux distincts sont créés.
- Le paquet S1 est envoyé à partir de l'antenne « 1 E » à destination de « 1 R » et S2 est envoyé de « 2 E » pour « 2 R » ;
- A la réception chaque antenne reçoit à la fois ce qui a été envoyé par « 1 E » et « 2 E » multiplié par un coefficient complexe en fonction de leur canal.
- Pour recomposer la trame il faut résoudre un système de deux équations à deux inconnues afin d'isoler S1 et S2 (résolution plus simple dans le domaine fréquentiel - OFDM- que dans le domaine temporel).
- Dans MIMO-SDM, les coefficients complexes de chaque canal sont calculés (et transmis dans la trame) pour optimiser le débit global.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

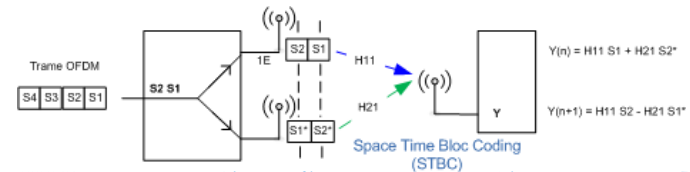
69

WLAN

Couche ϕ 802.11n : STBC

Le codage des blocs à intervalle de temps (STBC) pour la robustesse.

- Comme le MIMO-SDM, le MIMO-STBC envoie des signaux différents sur chaque antenne.
- Le principe du STBC est d'introduire une redondance d'information entre les deux antennes et ainsi d'améliorer l'immunité aux interférences et au bruit pour une même puissance d'émission mais sans gagner du débit
- L'émetteur envoie sur une antenne S1 et S2 et sur l'autre le conjugué de S2 puis le conjugué de S1 négatif.
- Le récepteur va dans un premier temps déterminer les coefficients complexes des canaux comme dans le SDM et recevoir ensuite les couples (S1, S2*) puis (S2, -S1*).
- Avec ces deux couples la trame émise va pouvoir être reconstituée de façon très sûre grâce un système de vérification entre les paquets S1 et S2 envoyés et leurs conjugués.
- Grâce au STBC, la transmission est plus robuste tout en gardant des débits équivalents.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

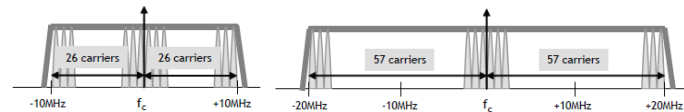
70

WLAN

Couche ϕ 802.11n

Différentes techniques combinées

- Dans la norme 802.11n, les techniques SDM et STBC sont combinées avec un nombre variable d'antennes pour améliorer les débits et la robustesse (et éventuellement la portée).
- Le nombre de sous-porteuses peut également être doublé pour augmenter la bande passante et améliorer le débit (le canal 802.11 est alors doublé à 40 Mhz).



- Pour améliorer encore les débits 802.11n, l'intervalle de garde entre les symboles OFDM peut être réduit.
- Pour une valeur donnée du rapport Signal à Bruit (SNR), les systèmes 802.11n sont capable de changer les vitesses de modulation pour trouver le meilleur compromis entre le débit et le taux d'erreur (BER).
- Le SNR est également réévalué en permanence par le récepteur.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

71

WLAN

Couche ϕ 802.11 : débits réels

- Rappelons qu'il s'agit de débit au niveau du signal, le débit au niveau des données est limité par la surcharge introduite par les en-têtes, par le temps d'accès au support (écoute, attente...), par les interférences...
- La norme 802.11g est compatible avec la norme 802.11b pour les débits inférieurs ou égaux à 11 Mbps.
- Pour la plupart des cartes 802.11g, une procédure de réduction du débit est mis en place dès que les conditions de réception sont dégradées (augmentation de la distance et diminution du rapport Signal/Bruit).
- Les améliorations apportées par MIMO (SDM, nombre d'antennes, sous-canaux de 40 Mhz...) permettent d'atteindre 248 Mbit/s (600 Mbit/s en théorie) avec 802.11n.

Protocole	Date	Fréquence	Débit données (Typ)	Débit signal (Max)	Modulation	Portée intérieur	Portée extérieur
802.11	1997	2.4 GHz	0.9 Mbit/s	2 Mbit/s		~20 m	~100 m
802.11a	1999	5 GHz	23 Mbit/s	54 Mbit/s	OFDM	~35 m	~120 m
802.11b	1999	2.4 GHz	4.3 Mbit/s	11 Mbit/s	DSSS	~38 m	~140 m
802.11g	2003	2.4 GHz	19 Mbit/s	54 Mbit/s	OFDM	~38 m	~140 m
802.11n	2009	2.4 GHz 5 GHz	74 Mbit/s	248 Mbit/s	OFDM (+MIMO)	~70 m	~250 m

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

72

WLAN Sous-couche MAC 802.11

- ❑ La sous-couche MAC est unique au protocole 802.11 avec quelques améliorations sur les normes 802.11g et 802.11n
- ❑ Elle définit deux fonctions de coordination des échanges correspondant à deux méthodes d'accès différentes :
 - PCF (*Point Coordination Function*) est basé sur l'interrogation à tour de rôle des terminaux (*polling*) par l'AP.
Ce mode utilisé en alternance avec un mode distribué (DCF) est conçu pour des applications de type temps réel, telles que la voix ou la vidéo.
En pratique, très rarement implémenté dans les équipements.
 - DCF (*Distributed Coordination Function*) n'est pas fondé sur une gestion centralisée
DCF permet la prise en charge du transport de données asynchrones avec des chances égales pour toutes les stations d'accéder au support (type *best effort*).
Un réseau *ad hoc* utilise uniquement le DCF.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

73

WLAN La méthode d'accès CSMA/CA

- ❑ La méthode d'accès CSMA/CD des réseaux Ethernet n'est pas utilisable pour les réseaux sans fil :
 - la détection de collision implique que la station émettrice puisse écouter et transmettre en même temps ;
 - une station qui émet des ondes radio sature son récepteur si celui-ci écoute simultanément ;
- ❑ Une autre méthode d'écoute du support permettant d'éviter les collisions est utilisée : **CSMA/CA** (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*).
- ❑ CSMA/CA est basée sur :
 - l'écoute du support avant d'émettre (*Carrier Sense*) ;
 - des temporisateurs d'espacement entre les trames (IFS : *Inter-Frame Spacing*) ;
 - des trames d'acquittement (ACK) envoyées par la station destination ;
 - l'algorithme d'attente « *Backoff* » pour éviter une collision.

UMLV-M2

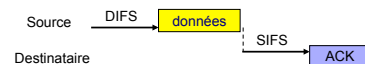
Réseaux sans fil

S. Lohier

74

WLAN Fonctionnement de CSMA/CA

- ❑ Une station voulant transmettre écoute le support :
 - S'il est occupé, la transmission est différée ;
 - Si le support est libre pendant un temps supérieur au DIFS (*Distributed IFS*), alors la station est autorisée à transmettre :
 - ✓ La station réceptrice vérifie le CRC du paquet reçu et renvoie un accusé de réception (ACK) après un temps inter-trame SIFS (*Short IFS*);
 - ✓ La réception de l'ACK indique à l'émetteur qu'aucune collision n'a eu lieu ;
 - ✓ Si l'émetteur ne reçoit pas l'accusé de réception, il retransmet le fragment jusqu'à ce qu'il l'obtienne ou abandonne au bout d'un certain nombre de retransmissions (Default Retry Limit = 7);



UMLV-M2

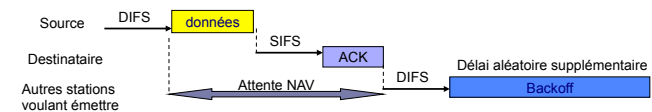
Réseaux sans fil

S. Lohier

75

WLAN Fonctionnement de CSMA/CA (2)

- Si le support n'est pas libre après attente du DIFS :
 - ✓ La station attend un temps calibré NAV (*Network Allocation Vector*) ;
 - ✓ Après attente du NAV augmenté d'un temps inter-trame DIFS, la station qui peut être en compétition avec d'autres cherche à éviter les collisions en attendant encore un temps aléatoire ;
 - ✓ Ce temps supplémentaire est calculé suivant un algorithme dit de « *Backoff* exponentiel ».



UMLV-M2

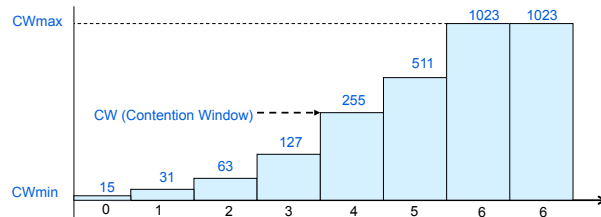
Réseaux sans fil

S. Lohier

76

WLAN Algorithme de Backoff exponentiel

- Algorithme permettant de tirer un temps d'attente aléatoire avant émission :
 - tirage d'un nombre $n = \text{Random}[0, CW]$;
 - CW est la fenêtre de contention bornée à CW_{\max} (255 pour 802.11, 1023 pour 802.11b et g) ;
 - attente de $n \times \text{Tslot}$ (Tslot : durée prédéterminé du Timeslot = 20 μs) ;
 - puis émission si canal libre.
- Backoff « exponentiel » : la taille de la fenêtre de contention est doublée à chaque tentative de transmission :
 - $CW_i = 2^{k_i} - 1$
 - i : nombre de tentatives transmission ;
 - k : entier définissant la valeur de CW_{\min} ($k=4$ et $CW_{\min} = 15$ pour 802.11g).



UMLV-M2

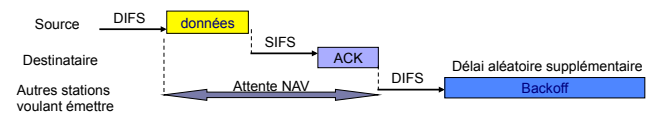
Réseaux sans fil

S. Lohier

77

WLAN Algorithme de Backoff exponentiel (2)

- Algorithme appliqué :
 - quand une station écoute le support avant la 1ère transmission et qu'il est occupé pendant un temps supérieur au DIFS ;
 - après chaque retransmission ;
 - après une transmission réussie ;
 - après une détection de collision.
- Non utilisé si le support a été libre pendant une durée supérieure au DIFS.



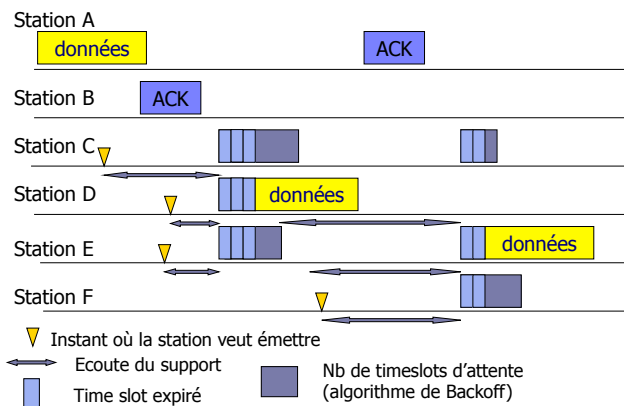
UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

78

WLAN Algorithme de Backoff Exponentiel (3)



UMLV-M2

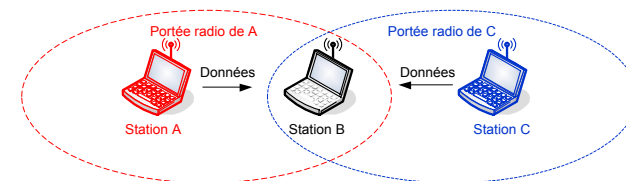
Réseaux sans fil

S. Lohier

79

WLAN Problème de la station cachée

- Une station A émet vers une station B ;
- C qui est hors de portée de A n'entend pas l'émission de A et risque de vouloir émettre à son tour vers B ;
- C peut donc provoquer une collision qui ne peut être évitée par la méthode CSMA/CA.



UMLV-M2

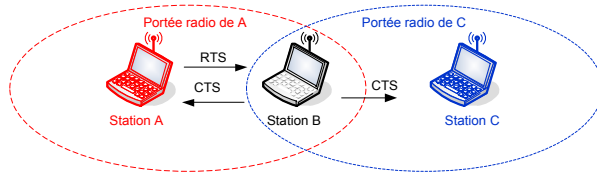
Réseaux sans fil

S. Lohier

80

WLAN Problème de la station cachée (2)

- Mécanisme RTS / CTS :
 - Une station voulant émettre transmet d'abord une petite trame de contrôle RTS (*Request To Send*).
 - La station destination concernée répond après attente d'un temps SIFS avec une trame courte CTS (*Clear To Send*).
 - Les stations cachées hors de portée de l'émetteur seront ainsi prévenues d'une émission en cours.
- Ce mécanisme n'évite pas les collisions de RTS ou de CTS, mais celles-ci sont moins coûteuses que des collisions de longues trames de données.



UMLV-M2

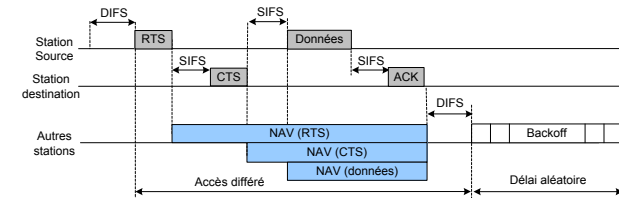
Réseaux sans fil

S. Lohier

81

WLAN Problème de la station cachée (3)

- Le mécanisme RTS/CTS permet également de réserver le support pendant un temps paramétrable.
- Cette réservation est basée sur une détection de porteuse virtuelle au niveau MAC (**VCS : Virtual Carrier Sense**) :
 - la station voulant émettre transmet d'abord un RTS ;
 - toutes les stations qui entendent le RTS mettent à jour leurs NAV en fonction du champ durée du RTS ;
 - la station destination concernée répond après attente d'un temps SIFS avec un CTS ;
 - le NAV est de nouveau mis à jour par les stations entendant le CTS ;
 - après réception du CTS par la station source, celle-ci est assurée que le support est réservé pour sa transmission pendant un temps au moins égal au NAV.



UMLV-M2

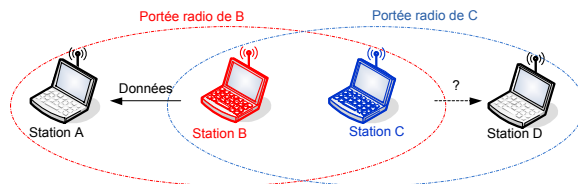
Réseaux sans fil

S. Lohier

82

WLAN Problème de la station exposée

- La station B est en train d'émettre vers A.
- Question : la station C souhaite émettre vers D. Peut-elle le faire ?



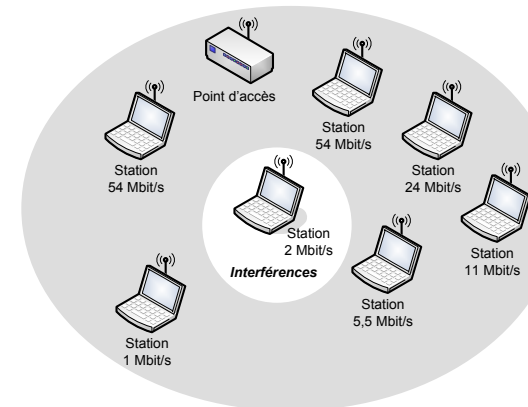
UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

83

WLAN Problème du débit partagé (1)



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

84

WLAN Problème du débit partagé (2)

- ❑ Le débit réel d'un réseau 802.11 n'est pas stable et peut varier dans le temps.
- ❑ Le réseau étant partagé, les ressources sont divisées entre tous les utilisateurs de la même cellule.
- ❑ Les interfaces WiFi ont la particularité d'adapter leur débit d'émission en fonction du rapport Signal à Bruit (S/N) mesuré à la réception d'une trame.
- ❑ Lorsqu'une station n'a pas la qualité suffisante pour émettre à 54 Mbit/s, elle dégrade son débit à 48, 36, 24, 18, 11, 5,5, 2, 1 Mbit/s.
- ❑ Cette dégradation provient soit d'un éloignement, soit d'obstacles, soit d'interférences.
- ❑ Cette solution présente l'avantage de conserver des cellules assez grandes.
- ❑ L'inconvénient principal est qu'il est impossible de prédire le débit d'un point d'accès : si une station transmet à 54 Mbit/s et une autre à 1 Mbit/s, le débit réel moyen du point d'accès sera plus proche de 1 Mbit/s.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

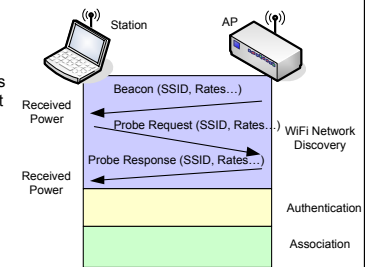
85

WLAN Entrée d'une station dans une cellule

- ❑ Après allumage, mode veille ou déplacement géographique, une station veut rejoindre une cellule.

- ❑ **Découverte du réseau :** synchronisation sur l'AP (ou sur les autres stations dans le mode ad hoc).

- Par **écoute passive** : écoute des trames balise (*beacon*) émises périodiquement (100 Ms) par l'AP et contenant :
 - ✓ le nom du réseau (SSID) ;
 - ✓ les débits supportés.
- Ou par **écoute active** : émission d'une trame de requête (*Probe Request*) et attente de la réponse de l'AP (*Probe Response*).
- Dans les deux cas, la station choisit l'AP qui délivre la plus grande puissance (et éventuellement d'autres critères : Packet Error Rate, Access Point Load...)



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

86

WLAN SSID et Rates dans une trame balise

```

❑ Frame 1 (148 bytes on wire, 148 bytes captured)
❑ Radiotap Header v0, Length 24
❑ IEEE 802.11 Beacon frame, Flags: .....C
❑ IEEE 802.11 wireless LAN management frame
❑ Fixed parameters (12 bytes)
❑ Tagged parameters (84 bytes)
❑ SSID parameter set: "brucan09wifi"
❑ Supported Rates: 1,0(B) 2,0(B) 5,5(B) 11,0(B) 6,0 9,0 12,0 18,0
❑ DS Parameter set: Current Channel: 6
❑ Traffic Indication Map (TIM): DTIM 2 of 3 bitmap empty
❑ ERP Information: no Non-ERP STAs, do not use protection, long preambles
❑ Extended Supported Rates: 24,0 36,0 48,0 54,0
❑ Vendor Specific: Xortecoy
    Tag Number: 221 (Vendor Specific)
    Tag length: 40
    Vendor: Xortecoy
    Tag interpretation: Not interpreted
0000 00 00 18 00 ee 58 00 00 10 02 85 09 a0 00 ab 9c .....X.....
0010 40 00 00 0f 95 c3 93 b0 80 00 00 00 ff ff ff ff @.....
0020 ff ff 00 1d c2 00 01 02 00 1d c2 00 01 02 80 54 .....T.....
0030 9b e1 45 99 2d 04 00 00 64 00 01 04 00 0c 62 72 ..E...d....br
0040 75 63 6f 6e 30 39 77 69 66 69 01 08 82 84 8b 96 ucon09wi fi....
0050 0c 12 18 24 03 01 06 05 04 02 03 00 00 2a 01 04 ...$......*
0060 32 04 30 48 60 6c dd 28 00 1d c2 8b 17 16 26 16 2.OH'l.(...b...
0070 45 45 0b 5c 9f 00 00 00 0f 15 15 16 17 6f 16 12 E...h...o...o...
0080 45 17 27 1c 54 16 16 22 14 11 17 43 2c 16 1a 16 E..T...C...
0090 95 c3 93 b0 .....
    
```

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

87

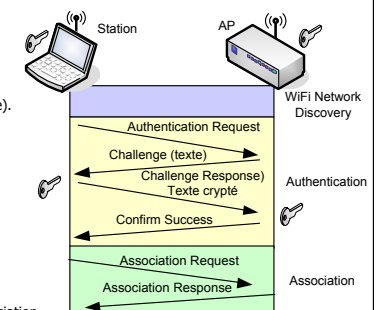
WLAN Authentification et association

- ❑ **Authentification**
La station doit connaître la clé d'authentification du point d'accès.

1. La station émet une trame « demande d'authentification ».
2. Le point d'accès renvoie un texte (challenge).
3. La station crypte le texte avec la clé d'authentification partagée (algo. RC4).
4. Le point d'accès confirme ou non l'authentification du poste.

- ❑ **Association**

1. La station demande les informations d'association.
2. Le point d'accès informe la station sur les capacités de la cellule, et enregistre la position du poste (niveau du signal).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

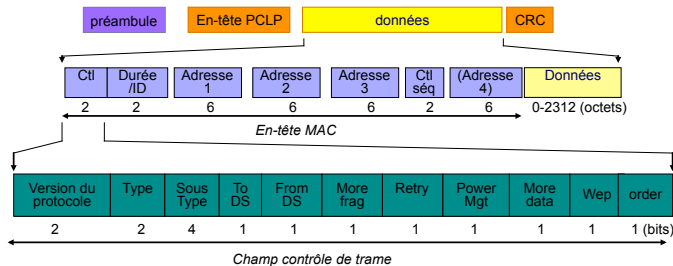
S. Lohier

88

WLAN Les trames 802.11

Les trames 802.11 sont constituées :

- D'un préambule : suite de 80 bits alternant 0 et 1 pour sélectionner l'AP le plus proche, suivis du début de trame (*Start Frame Delimiter*) constitué de 16 bits (0000 1100 1011 1101).
- D'un en-tête PCLP (*Physical Layer Convergence Procedure*) qui contient entre autre la longueur du champ des données.
- D'une en-tête MAC qui contient entre autre les adresses MAC (source, destination et AP) et le type de trame.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

89

WLAN Les trames 802.11 (2)

Champs Contrôle

- **Version** : identifier la version du protocole IEEE 802.11 (actuellement 0)
- **Type** : 3 types possibles; trames de gestion, de contrôle ou de données
- **Sous-type** : pour chaque type il existe des sous-types
- **To DS** : ce bit est mis à 1 si la trame est adressée au DS (*Distribution System*) c-à-d le point d'accès, à 0 dans les autres cas.
- **From DS** : ce bit est mis à 1 lorsque la trame vient de l'AP.
- **More Fragment** : ce bit est mis à 1 si d'autres fragments suivent le fragment en cours
- **Retry** : ce bit est mis à 1 si le fragment est une retransmission (utile pour le récepteur si ack perdu)
- **Power Management** : indique que la station sera en mode de gestion d'énergie après cette trame
- **More Data** : également pour la gestion d'énergie; le AP indique qu'il a d'autres trames pour cette station
- **WEP** : indique que le corps de la trame sera chiffré selon l'algorithme WEP
- **Order** : indique que cette trame est envoyée en utilisant la classe de service « strictement ordonné »

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

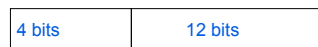
90

WLAN Les trames 802.11 (3)

Champ Durée

- Dans la plupart des trames, ce champ indique la durée, en µs, de la prochaine trame transmise, pour le calcul du NAV.
- En mode économie d'énergie, dans les trames de contrôle, ce champ indique l'ID de la station en association. Les 2 premiers bits sont mis à 1. Les valeurs possibles dans les 14 bits restants vont de 1 à 2007.

Contrôle de séquence



n° de fragment

n° de séquence

- Le numéro de fragment commence à 0 pour le premier fragment d'un MSDU, puis s'incrmente de 1 à chaque nouveau fragment transmis
- Le numéro de séquence commence à 0, et s'incrmente de 1 à chaque nouveau MSDU.
- Tous les fragments d'un même MSDU ont le même numéro de séquence.
- Cela permet à un filtre d'éliminer des trames dupliquées à cause de pertes d'acquittements.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

91

WLAN Les trames 802.11 (4)

Champs Adresse 1, 2, 3, 4

- Une trame peut contenir jusqu'à 4 adresses, selon les bits ToDS et FromDS
 - ✓ Adresse 1 est toujours l'adresse du récepteur. Si ToDS est à 1 c'est l'adresse de l'access point, sinon c'est celle de la station
 - ✓ Adresse 2 est toujours l'adresse de l'émetteur. Si FromDS est à 1 c'est l'adresse de l'access point, sinon c'est celle de la station
 - ✓ Adresse 3 est l'adresse de l'émetteur original, quand le champ FromDS est à 1. Sinon si ToDS est à 1 c'est l'adresse destination
 - ✓ Adresse 4 est utilisée dans le cas où le système de distribution sans fil est utilisé et qu'une trame est transmise entre deux points d'accès. Dans ce cas ToDS et FromDS sont tous les deux à 1 et il faut donc renseigner à la fois l'émetteur original et le destinataire.

ToDS	FromDS	Adr1	Adr2	Adr3	Adr4
0	0	DA	SA	BSSID	N/A
0	1	DA	BSSID	SA	N/A
1	0	BSSIB	SA	DA	N/A
1	1	RA	TA	DA	SA

RA = adresse du récepteur DA = adresse du destinataire BSSID = adresse AP
TA = adresse du transmetteur SA = adresse de l'émetteur d'origine

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

92

WLAN Exemple de capture 802.11

Exemple de trame balise

No..	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1	0.000000	D-Link_2e:bc:d Broadcast		IEEE 802.11	Beacon frame, SN=2183, FN=0, Flags=....., BI=100
2	0.102515	D-Link_2e:bc:d Broadcast		IEEE 802.11	Beacon frame, SN=1109, FN=0, Flags=....., BI=100
3	0.171393	Apple_4e:00:e3 Broadcast		IEEE 802.11	Probe Request, SN=2901, FN=0, Flags=....., SSID=
4	0.172204	D-Link_2e:bc:d Apple_4e:00:e3		IEEE 802.11	Probe Response, SN=1110, FN=0, Flags=....., BI=1
5	0.172523	D-Link_2e:bc:d	D-Link_2e:bc:d	IEEE 802.11	Acknowledgement, Flags=.....

Frame 1 (85 bytes on wire, 85 bytes captured)

Radiotap Header v0, Length 18

IEEE 802.11 beacon frame, Flags:

Type/Subtype: Beacon frame (0x08)

Frame control: 0x0080 (Normal)

Version: 0

Type: Management frame (0)

Subtype: 8

Flags: 0x0

.....00 = DS status: Not leaving DS or network is operating in AD-HOC mode (To DS: 0 From DS: 0) (0x00)

.....0.. = More Fragments: This is the last fragment

....0... = Retry: Frame is not being retransmitted

...0.... = PWR MGT: STA will stay up

..0.... = More data: No data buffered

..0.... = Protected flag: Data is not protected

0... = Order flag: Not strictly ordered

Duration: 0

Destination address: broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)

Source address: D-Link_2e:bc:b6 (00:80:c8:2e:bc:b6)

BSS ID: 02:80:c8:2e:bc:d2 (02:80:c8:2e:bc:d2)

Fragment number: 0

Sequence number: 2183

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

93

WLAN Exemple de capture 802.11

Couche physique

No..	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1	0.000000	192.168.1.132	192.168.1.1	DNS	Standard query A www.polito.it
2	0.000020	GemtekTe_cb:6e	GemtekTe_cb:6e	IEEE 802.11	Acknowledgement, Flags=.....C
3	0.000036	192.168.1.1	192.168.1.132	DNS	Standard query response CNAME web01
4	0.000052	GemtekTe_cd:74	GemtekTe_cd:74	IEEE 802.11	Acknowledgement, Flags=.....C
5	0.001716	192.168.1.132	130.192.73.1	TCP	netmp1 > http [SYN] Seq=0 Win=65535

Frame 2 (46 bytes on wire, 46 bytes captured)

PPI version 0, 32 bytes

version: 0

Flags: 0x00

Header Length: 32

DLT: 105

802.11-Common

Field type: 802.11-Common (2)

Field length: 20

TSP: 4090330774

Flags: 0x0001

Rate: 24.0 Mbps

Channel frequency: 2422 [B6 3]

Channel type: 802.11g (pure-g) (0x00c0)

FHSS hopset: 0x00

FHSS pattern: 0x00

dBm antenna signal: -65

dBm antenna noise: -96

IEEE 802.11 Acknowledgement, Flags:C

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

94

WLAN Exemple de capture 802.11

Trame d'acquiescement

No..	Time	Source	Destination	Protocol	Info
1	0.000000	192.168.1.132	192.168.1.1	DNS	Standard query A www.polito.it
2	0.000020	GemtekTe_cb:6e	GemtekTe_cb:6e	IEEE 802.11	Acknowledgement, Flags=.....C
3	0.000036	192.168.1.1	192.168.1.132	DNS	Standard query response CNAME web01.polito.it A 130
4	0.000052	GemtekTe_cd:74	GemtekTe_cd:74	IEEE 802.11	Acknowledgement, Flags=.....C
5	0.001716	192.168.1.132	130.192.73.1	TCP	netmp1 > http [SYN] Seq=0 Win=65535 Len=0 MSS=1460

Frame 2 (46 bytes on wire, 46 bytes captured)

PPI version 0, 32 bytes

IEEE 802.11 Acknowledgement, Flags:C

Type/Subtype: Acknowledgement (0x10)

Frame control: 0x00d4 (Normal)

Version: 0

Type: Control frame (1)

Subtype: 13

Flags: 0x0

.....00 = DS status: Not leaving DS or network is operating in AD-HOC mode (To DS: 0 From DS: 0) (0x00)

.....0.. = More Fragments: This is the last fragment

....0... = Retry: Frame is not being retransmitted

...0.... = PWR MGT: STA will stay up

..0.... = More data: No data buffered

..0.... = Protected flag: Data is not protected

0... = Order flag: Not strictly ordered

Duration: 0

Receiver address: GemtekTe_cb:6e:1a (00:14:a5:cb:6e:1a)

Frame check sequence: 0xc2943c1 [correct]

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

95

WLAN Exemple de capture 802.11

Présence de la sous-couche LLC dans les trames de données

No..	Time	Source	Destination	Protocol	Info
10	0.203212	GemtekTe_cb:6e	GemtekTe_cb:6e	IEEE 802.11	Acknowledgement, Flags=.....C
11	0.205066	192.168.1.132	130.192.73.1	HTTP	GET / HTTP/1.0
12	0.205083	GemtekTe_cb:6e	GemtekTe_cb:6e	IEEE 802.11	Acknowledgement, Flags=.....C
13	0.405611	130.192.73.1	192.168.1.132	TCP	http > netmp1 [ACK] Seq=1 Ack=1
14	0.405923	GemtekTe_cd:74	GemtekTe_cd:74	IEEE 802.11	Acknowledgement, Flags=.....C

Frame 11 (263 bytes on wire, 263 bytes captured)

PPI version 0, 84 bytes

IEEE 802.11 QoS Data, Flags:TC

Logical-Link Control

DSAP: SNAP (0xaa)

IG Bit: Individual

SSAP: SNAP (0xaa)

CR Bit: Command

Control field: u, func=UI (0x03)

000. 00.. = Command: Unnumbered Information (0x00)

.....11 = Frame type: Unnumbered frame (0x03)

organization code: Encapsulated Ethernet (0x000000)

Type: TP (0x0800)

Internet Protocol, Src: 192.168.1.132 (192.168.1.132), Dst: 130.192.73.1 (130.192.73.1)

Transmission control Protocol, Src Port: netmp1 (3827), Dst Port: http (80), Seq: 1, Ack: 1

Hypertext Transfer Protocol

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

96

WLAN

Exemple de capture 802.11

Analyse de la sous-couche MAC

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Info
9	0.203195	192.168.1.132	130.192.73.1	TCP	netmp1 > http [ACK] Seq=1 Ack=1
10	0.203212	GemtekTe_cb:6e:1a	GemtekTe_cb:6e:1a	(RA IEEE 802 Acknowledgement, Flags=.....	
11	0.203205	192.168.1.132	130.192.73.1	TCP	netmp1 > http [ACK] Seq=1 Ack=1
12	0.205083	GemtekTe_cb:6e:1a	GemtekTe_cb:6e:1a	(RA IEEE 802 Acknowledgement, Flags=.....	
13	0.405611	130.192.73.1	192.168.1.132	TCP	http > netmp1 [ACK] Seq=1 Ack=1

Frame 11 (263 bytes on wire, 263 bytes captured)
 PPI version 0, 84 bytes
 IEEE 802.11 QoS Data, Flags:TC
 Type/Subtype: QoS Data (0x28)
 Frame Control: 0x0188 (Normal)
 Version: 0
 Type: Data frame (2)
 Subtype: 8
 Flags: 0x1
 Duration: 44
 BSS Id: GemtekTe_cd:74:7b (00:14:a5:cd:74:7b)
 Source address: GemtekTe_cb:6e:1a (00:14:a5:cb:6e:1a)
 Destination address: 3com_27:f9:b2 (00:01:02:27:f9:b2)
 Fragment number: 0
 Sequence number: 3806
 Frame check sequence: 0x8259e6fd [correct]
 QoS Control
 Logical-Link Control
 Internet Protocol, Src: 192.168.1.132 (192.168.1.132), Dst: 130.192.73.1 (130.192.73.1)
 Transmission Control Protocol, Src Port: netmp1 (3827), Dst Port: http (80), Seq: 1, Ack: 1, Len: 101
 Hypertext Transfer Protocol

UMLV-M2

Réseaux sans fil

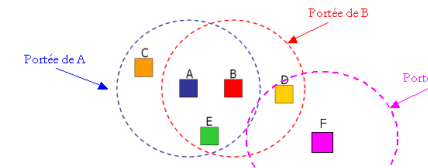
S. Lohier

97

Questions sur le WiFi

On considère le réseau sans fil ci-dessous. Il applique le protocole CSMA/CA. A $t=0$, A décide d'émettre vers B.

1) En l'absence de trames d'avertissement RTS/CTS, quelles stations peuvent détecter la transmission de A vers B ? Quelles sont les stations qui risquent de provoquer une collision ?



UMLV-M2

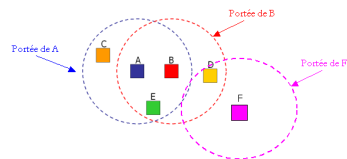
Réseaux sans fil

S. Lohier

98

Questions sur le WiFi

2) Dès que les stations A et B ont échangé les trames RTS et CTS, toute collision avec leurs données est-elle impossible ? Expliquez.



UMLV-M2

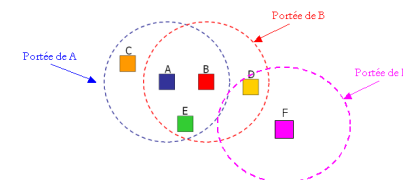
Réseaux sans fil

S. Lohier

99

Questions sur le WiFi

3) La station D a-t-elle le droit d'émettre vers la station F pendant la communication entre les stations A et B ?



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

100

Calculs sur le débit réel de 802.11

- Calculer le débit réel d'une seule station qui émet des paquets de 1000 octets de données sur un réseau composé uniquement de stations 802.11g.
- Le temps de backoff utilisé pour chaque trame correspond au temps de backoff moyen.
- Les paramètres 802.11g sont les suivants :

Paramètre	Valeur
Temps DIFS	28 µs
Temps SIFS	10 µs
Temps en-tête physique OFDM	20 µs
Taille en-tête MAC pour les données	34 octets
Temps d'envoi de l'ACK	10 µs
TimeSlot	9 µs
CW	0-15

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

101

Calculs sur le débit réel de 802.11

- Calculer le débit réel d'une seule station qui émet des paquets de 1000 octets de données sur un réseau composé de stations 802.11g et de stations 802.11b.
- Les paramètres 802.11b sont les suivants :

Paramètre	Valeur
Temps DIFS	50 µs
Temps SIFS	10 µs
Temps en-tête physique DSSS	192 µs
Taille en-tête MAC pour les données	34 octets
Taille de l'ACK	14 octets
Slot	20 µs
CW	0-31

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

102

WLAN UWB : principe

- L'UWB (*Ultra Wide Band*) est une technique d'étalement de spectre pour les applications sans fil haut débit (100 Mbit/s) et courtes distances (30 m).
- Le principe est d'envoyer des séries de courts signaux à basse puissance sur toute la bande de fréquence et non sur une fréquence particulière.
- Les avantages sont :
 - la très faible densité spectrale de puissance (réutilisation de bandes licenciées) ;
 - la forte diversité fréquentielle (bonne résistance aux interférences) ;
 - la forte résolution temporelle du signal (multi trajets et contournement d'obstacle) ;
 - les débits élevés (large bande) ;
 - la faible consommation (puissance faibles).
- Technique en cours de normalisation : 802.15.3a

UMLV-M2

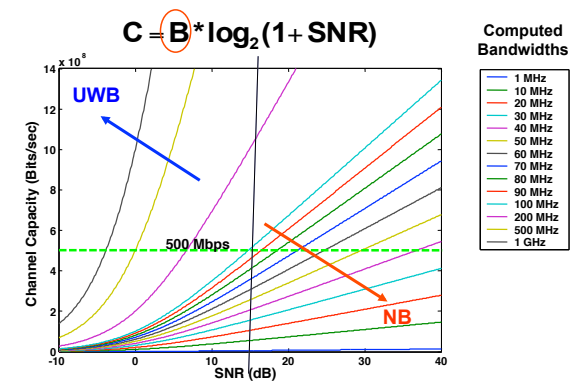
Réseaux sans fil

S. Lohier

103

WLAN Capacité UWB

- Loi de Shannon sur la capacité C d'un canal :



UMLV-M2

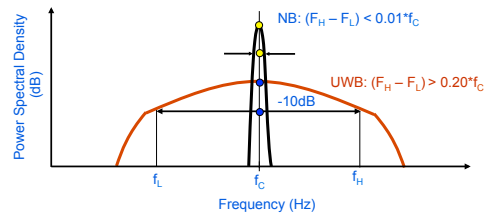
Réseaux sans fil

S. Lohier

104

WLAN UWB : définition

- Une émission UWB occupe au moins 20% de la fréquence centrale ou une largeur de bande d'au moins 500 MHz.



- Réglementation de la FCC (*Federal Communications Commission*) et de l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*)
 - ouverture d'une bande de 3.1 à 10,6 GHz ;
 - puissance moyenne très limitée : - 41.3 dBm/MHz ;
 - puissance crête : 0 dBm/50 MHz.

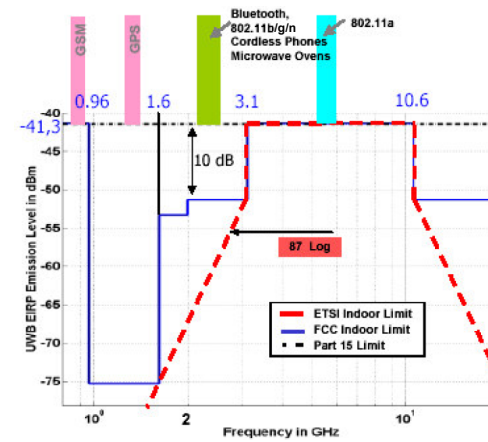
UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

105

WLAN Étalement de spectre UWB



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

106

WLAN Techniques d'émission UWB

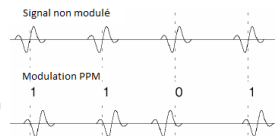
- Émission : plusieurs impulsions codent un symbole

- Modulations possibles :

- ✓ PPM : modulation par la position de l'impulsion ;
- ✓ BPSK : Inversion de la polarité de l'impulsion ;
- ✓ OOK : tout ou rien (impulsion ou pas).

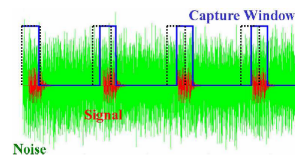
- Utilisation du saut temporel (TH) pour :

- ✓ Blanchir le spectre (casser la période de répétition des impulsions) ;
- ✓ Forme d'accès multiple.



- Réception : démodulation sur des fenêtres d'écoute :

- Réduction du bruit ;
- Nécessite une synchro précise.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

107

WLAN Applications UWB

- Applications multiples :

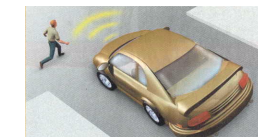
- Très haut débit, très courte portée :

- ✓ objectifs: 100 Mbit/s à 10 mètres, 480 Mbit/s à 2 mètres ;
- ✓ applications essentiellement multimédias et informatiques.



- Bas débit, portée moyenne et basse consommation :

- ✓ objectifs: 1 à 50 Kbit/s jusqu'à 30 mètres ;
- ✓ très forte autonomie ;
- ✓ forte capacité à la géo-localisation ;
- ✓ applications de type réseaux de capteurs, étiquettes RFID.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

108

WLAN

UWB et Wireless USB

- ❑ La couche physique UWB sert notamment de base à la nouvelle norme Wireless USB.
- ❑ L'objectif du WUSB est d'atteindre des débits comparables à ceux de l'USB2 : 480Mbps à 3 m et 10Mbps à 10 m.
- ❑ Il reprend les autres caractéristiques de l'USB :
 - capacité à reconnaître un périphérique lorsque l'utilisateur le branche alors que l'ordinateur est allumé (*hot plug*) ;
 - gestion en cascade de 127 périphériques.
- ❑ Il entre en concurrence avec des technologies WPAN telles Bluetooth avec des avantages :
 - débits plus importants ;
 - pas de problème d'interférence (3,1 – 10,6 GHz) ;
 - Meilleure traversée des obstacles (murs, meubles...).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

109

WPAN

Technologies des WPAN

- ❑ Plusieurs technologies pour les WPAN :



- **Bluetooth** : Ericsson, 1994. La principale technologie WPAN. Débit théorique de 1 Mbps, portée max d'une 30^{aine} de mètres. Normalisée sous le nom IEEE 802.15.1.



- **WUSB (Wireless USB)**. Débit théorique de 10 à 480 Mbps, portée de 3 à 10 m. Reprend les caractéristiques de l'USB 2.0. Basé sur une couche physique UWB.



- **ZigBee** (IEEE 802.15.4) : 2003. Liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie. Adaptée pour être directement intégrée dans de petits appareils électroniques (appareils électroménagers, hifi, jouets, ...).



- **Zwave**. Protocole radio conçu pour la domotique. Peut être utilisé dans un réseau maillé.

- **Liaisons infrarouges** : association IrDA (*Infrared Data Association*), 150 membres, 1995. Liaisons sans fils de qq m, débits de qq Mbit/s. Largement utilisées pour la domotique (télécommandes). Pb : perturbations des interférences lumineuses.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

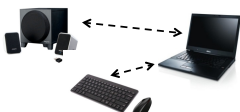
110

WPAN

Historique de Bluetooth



- ❑ 1994 : Ericsson s'attaque au développement du standard Bluetooth. Collaboration avec Intel.
- ❑ 1998 : Création du Bluetooth SIG (*Special Interest Group*) par Ericsson, Toshiba, IBM, Intel, Nokia.
But : développer et commercialiser un standard plus adapté aux réseaux personnels que le 802.11 conçu pour les WLAN.
- ❑ 1999 : Constitution d'un groupe de travail à l'IEEE pour normaliser le standard commercial Bluetooth sous le nom de 802.15.1.
- ❑ Bluetooth / IEEE 802.15.1 : standard pour les communications sans fil dans une sphère de 10 mètres de rayon autour de la personne statique ou en mouvement.
- ❑ Aujourd'hui, principaux usages :
 - Remplacement des câbles d'information entre PC et périphériques (souris, clavier, haut-parleurs...);
 - Liaison courte distance entre un smartphone et une oreillette ou deux ensembles émetteur/récepteur.



UMLV-M:

Réseaux sans fil

S. Lohier

111

WPAN

« Bluetooth » ???

- ❑ « Dent-Bleue » était le surnom du roi Harald (940 à 981) qui unifia le Danemark et la Norvège.
- ❑ Le nom aurait été attribué par un ingénieur d'Intel souhaitant affirmer l'origine nordique de cette technologie ainsi que l'objectif moral de « rallier » les technologies sans fil sous une seule norme.



UMLV-M2

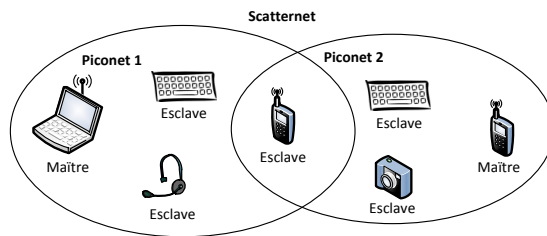
Réseaux sans fil

S. Lohier

112

WPAN Caractéristiques de Bluetooth

- Travaille dans la bande des 2.4 GHz au débit de 720 kbit/s.
- Modulation à saut de fréquence GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*).
- Transmission possibles en asynchrone et synchrone.
- Architecture en **piconets** de 8 équipements actifs maximum : 1 maître et 7 esclaves actifs.
- Les piconets peuvent être regroupés en **scatternets**.



UMLV-M2

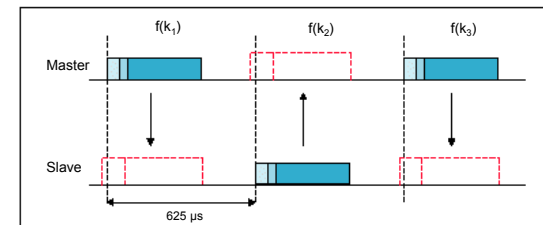
Réseaux sans fil

S. Lohier

113

WPAN Bluetooth : couche ϕ

- Modulation GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) dans la bande des 2.4 GHz.
- FSK : un bit un est représenté par une déviation positive de fréquence, un bit zéro par une déviation négative. La déviation maximale doit se trouver entre 140 et 175 KHz.
- Un filtre Gaussien est appliqué pour limiter la largeur spectral.
- Utilise le **FHSS** (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) :
 - La bande de fréquence [2.402 ; 2.480] GHz est partagée en 79 canaux de 1 Mhz.
 - Les émetteurs radio passent d'un canal à l'autre de manière pseudo aléatoire, déterminée par le maître.
 - Le canal utilisé est $(2.402 \text{ GHz} + k \text{ MHz})$ où $k \in [0, \dots, 78]$. k change 1600 fois par



UMLV-M2

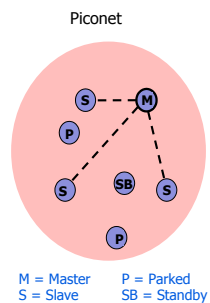
Réseaux sans fil

S. Lohier

114

WPAN Le piconet

- Piconet** : réseau d'équipements connectés en mode ad hoc, aux dimensions du *Personal Operating System* (sphère de 10 mètres de rayon autour de la personne statique ou en mouvement).
- Un équipement a le rôle de maître, les autres (7 au plus) sont esclaves pendant toute la durée de la connexion du piconet.
- Le maître donne la parole tour à tour en allouant des temps de parole appelés slots. Le maître émet durant les slots pairs et les esclaves les slots impairs.
- Le maître gère la synchronisation et la planification des sauts de fréquence.
- La séquence de sauts de fréquences est unique par piconet et elle est déterminée par l'identité Bluetooth de l'unité Maître.
- Le maître peut se connecter simultanément à 7 esclaves actifs, et peut gérer 200 esclaves inactifs (= *parked*) par piconets.



UMLV-M2

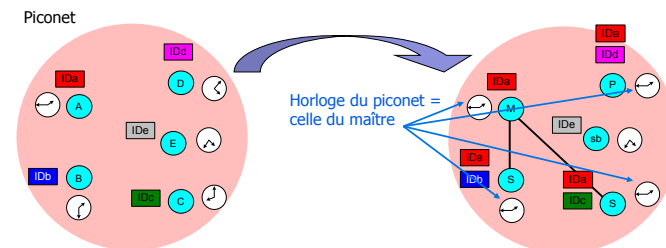
Réseaux sans fil

S. Lohier

115

WPAN Formation d'un piconet

- Tous les équipements du piconet changent de fréquence en même temps.
- Le maître fournit son horloge et son identifiant sur 48 bits.
- Le séquençement du saut de fréquence est déterminé à partir de cet identifiant, la phase est fournie par l'horloge du maître.
- Les équipements qui ne sont pas inclus dans le piconet sont en veille (*standby*).
- Deux types d'adresses : *Active Member Address* (AMA, 3-bits) et *Parked Member Address* (PMA, 8-bits)



UMLV-M2

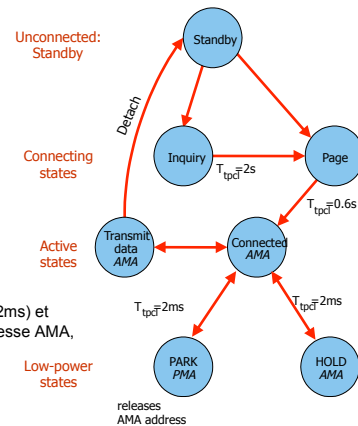
Réseaux sans fil

S. Lohier

116

WPAN État des équipements du piconet

- **Standby**
Attend de rejoindre un piconet
- **Inquire**
Recherche de canal pour se connecter
- **Page**
Connecté à un canal spécifique
- **Connected**
Actif sur un piconet (maître ou esclave)
- **Park/Hold**
Connecté mais ne participe pas (ts les 2ms) et faible puissance. Hold : détient une adresse AMA, Park : la rend.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

117

WPAN Les différents canaux physiques

- Transmission de paquets par polling :
 - le maître invite les esclaves à parler par polling ;
 - slots pairs pour l'émission du maître, impairs pour les esclaves ;
 - 1 slot : 625 μ s (max 1600 slots/s) ;
 - pour des ordinateurs en pico-réseau.
- Liaison synchrone orientée connexion (SCO, *Synchronous connection-oriented*) :
 - "orientée connexion" : attribution périodique d'un slot pour émettre un paquet ;
 - liaison full-duplex symétrique à 64 kbit/s ;
 - pour transmission téléphonique ou temps réel.
- Liaison asynchrone non connectée (ACL, *Asynchronous connection-less*) :
 - commutation de paquet ;
 - bande passante asymétrique : taille des paquets variable (1 à 5 slots) ;
 - une voie descendante à 723,2 kbit/s et voie montante à 57,6 kbit/s pour une liaison Internet par exemple ;
 - un seul canal par couple maître/esclave et un esclave ne peut émettre sur le slot suivant qu'après avoir reçu un paquet du maître.

UMLV-M2

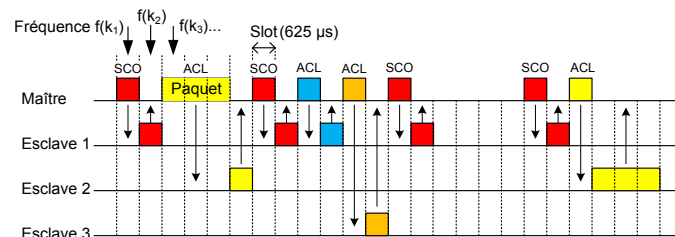
Réseaux sans fil

S. Lohier

118

WPAN Les différents canaux physiques (2)

- Les communications synchrones et asynchrones peuvent s'enchaîner.
- Le débit asynchrone peut être supérieur en descendant.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

119

WPAN Code d'accès de trame

- Une structure de trame unique est utilisée par le maître ou l'esclave.
- Le code d'accès de 72 ou 68 bits est composé de trois parties :
 - 4 bits de préambule pour la détection du début de trame ;
 - 64 bits pour la synchronisation et l'identification qui peuvent prendre différentes significations suivant l'état en cours :
 - ✓ code dérivé de l'adresse MAC pour l'état *page* ;
 - ✓ code commun pour permettre à une station de s'associer pour l'état *inquiry* ;
 - ✓ code unique identifiant le piconet pour l'état *connected*.



UMLV-M2

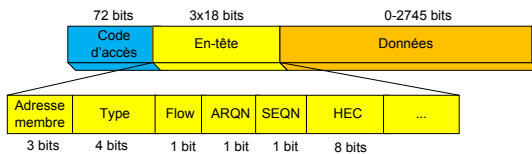
Réseaux sans fil

S. Lohier

120

WPAN Format des trames Bluetooth

- L'en-tête de trame (header) sur 18 bits suit un encodage de type FEC (*Forward Error Correction*) avec des séquences de répétition limitant les risques d'erreur et formant un ensemble de 54 bits (3×18) :
 - l'adresse membre est attribuée par le maître (7 esclaves possibles) ;
 - le type de message précise s'il s'agit d'un contrôle, d'une communication synchrone ou asynchrone ;
 - le bit flow permet le contrôle de flux en asynchrone ;
 - les bits SEQN (*SEQence Number*) et ARQN (*Automatic Repeat reQuest sequence Number*) permettent de numéroté et d'acquitter les trames ;
 - le champ HEC (*Header Error Check*) correspond à une somme de contrôle.



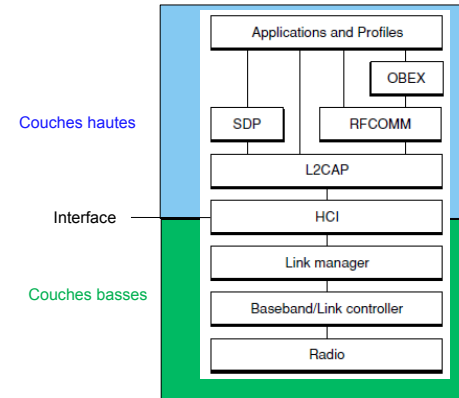
UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

121

WPAN La pile protocolaire Bluetooth



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

122

WPAN Protocoles des couches matérielles

- Couche Radio (RF)
 - Bande ISM (bande des 2.4GHz).
 - Débit : 1Mbps.
 - 1600 sauts de fréquence/s.
 - 3 classes de modules radio
- Couche Bande de base (*BaseBand*)
 - Définition des piconets et des canaux.
 - Partage du canal.
 - Format et gestion des trames SCO et ACL.
 - Gestion des adresses MAC.
- Couche Gestionnaire de liaisons (*Link Manager*)
 - Cryptage / authentification.
 - Intervalles de polling.
 - Établissement des liens SCO.
- HCI (*Host Controller Interface*)
- L2CAP (*Link Layer Control & Adaptation*)
- SDP (*Service Discovery Protocol*) :

Classe	Puissance	Portée
1	100 mW (20 dBm)	100 mètres
2	2,5 mW (4 dBm)	10 mètres
3	1 mW (0 dBm)	1 mètre

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

123

WPAN Bluetooth Low Energy 4.0

- Bluetooth LE ou BLE ou Bluetooth 4.0 permet en théorie une consommation 10 fois moindre pour le même débit d'1Mbps et une portée jusqu'à 60 m.
- Les applications sont dans le domaine du sport, de la santé, du contrôle d'accès et de la domotique.



- Une puce BLE est quasiment toujours en mode veille, sauf pour transmettre.
- En mode veille, le BLE consomme seulement 0,5 microampère.
- En mode transmission, la consommation est limitée 15 milliampères.
- Cette économie permet à une puce BLE de fonctionner de plusieurs mois à plus d'un an, avec une simple pile bouton.
- L'iPhone 4S (oct. 2011) est le premier appareil à intégrer Bluetooth LE.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

124

WPAN Bluetooth Low Energy 4.0

- ❑ Les couches basses de la pile protocolaire sont les mêmes.
- ❑ Les couches hautes sont simplifiées.
- ❑ Certaines puces proposent les deux modes (dual mode), la consommation est dans ce cas plus importante.

Bluetooth's Dual-mode advantage. One chip supports both applications

UMLV-M2
Réseaux sans fil
S. Lohier
125

WPAN Bluetooth

- ❑ Questions :
 - Pourquoi la portée de Bluetooth n'est-elle que de quelques mètres ?
 - Quel type d'accès au support est utilisé ?
 - Montrer qu'une station a un débit garanti.

UMLV-M2
Réseaux sans fil
S. Lohier
126

WPAN Les évolutions de la norme IEEE 802.15

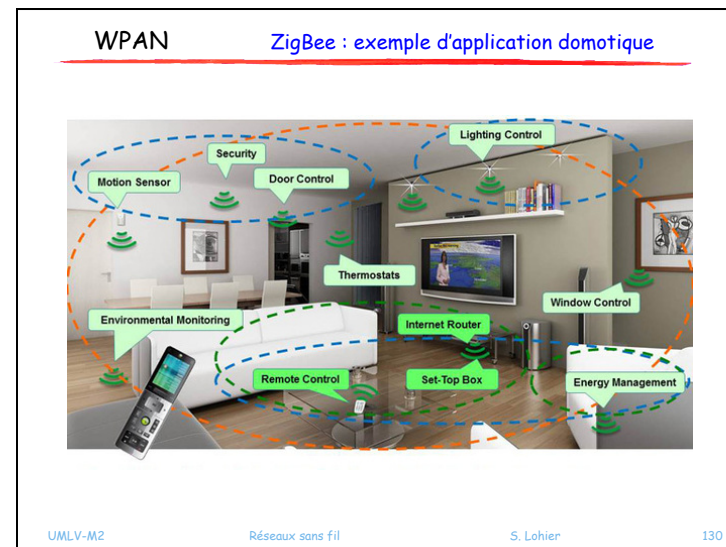
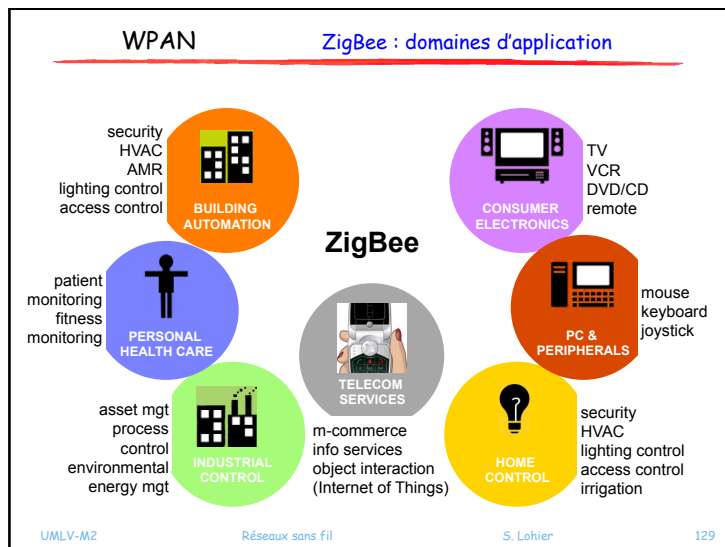
- ❑ **802.15.2** : ce groupe de travail est censé harmoniser l'utilisation de la bande.
 - Établit un modèle pour quantifier les interférences entre 802.11 (WLAN) et 802.15.1 (Bluetooth).
 - En charge de l'étude des mécanismes de coexistence entre WLAN et WPAN.
- ❑ **802.15.3** : norme entièrement développée au sein de l'IEEE et basée sur une architecture classique avec une adresse MAC sur le réseau physique. Pour applications multimédia, streaming.
 - Utilise le même réseau mais avec une gestion centralisée par un maître qui est appelé *PicoNet Coordinator*. Possibilité de connecter 253 stations actives sur le piconet.
 - Émet sur la même bande ISM, divisée en 4 canaux de 15MHz.
 - 4 modulations pour 4 débits : 22Mbit/s, 33Mbit/s, 44Mbit/s, 55Mbit/s.
 - Sécurité accrue.
- ❑ **802.15.4**, associé à la norme **ZigBee** pour les couches supérieures, offre une solution bas débit (250 kbit/s maximum) à coût très réduit.
 - Prévue pour des puces embarquées dans des badges électroniques, des capteurs industriels, des applications domotiques ou encore des jouets.

UMLV-M2
Réseaux sans fil
S. Lohier
127

WPAN ZigBee : présentation

- ❑ ZigBee est une norme de réseau sans fil de type WPAN (*Wireless Personal Area Network*) sécurisée à faible débit et faible consommation.
- ❑ Promue par l'Alliance ZigBee : un consortium d'entreprises telles que Philips, Honeywell, Mitsubishi, Motorola, et Samsung.
- ❑ S'appuie sur la spécification IEEE 802.15.4 sortie en 2004.
- ❑ Principaux avantages de ZigBee :
 - très faible consommation d'énergie en mode veille ;
 - faible taille du code de la pile de protocoles ZigBee à embarquer (développement de composants miniaturisés à très faible coût) ;
 - Les applications développées pour un réseau ZigBee utilisent des profils définis par la spécification de l'alliance ZigBee.

UMLV-M2
Réseaux sans fil
S. Lohier
128

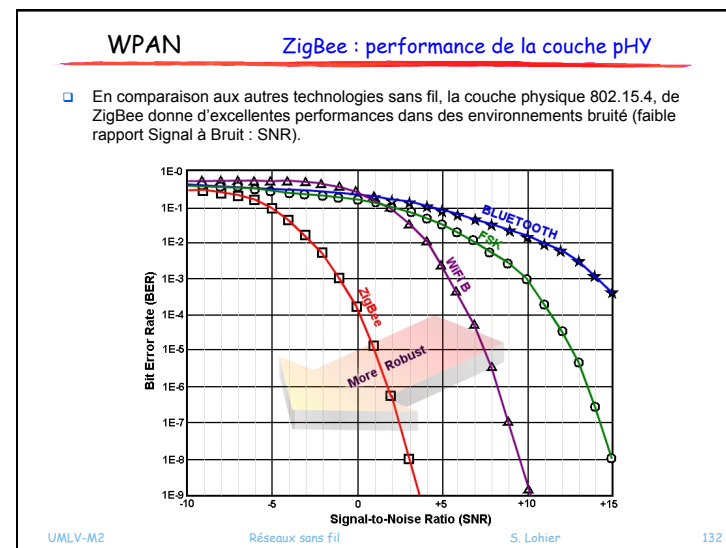


WPAN Caratéristiques principales de ZigBee

Standard	Débit	Portée	Consommation en transmission	Consommation en veille	Taille de la pile protocolaire
WiFi	2-54 Mbit/s	200 m	> 400 mA	20 mA	> 100 KO
Bluetooth	1 Mbit/s	10 m	40 mA	0,2 mA	< 100 KO
ZigBee	20-250 kbit/s	100 m	20 mA	< 0,01 mA	< 32 KO

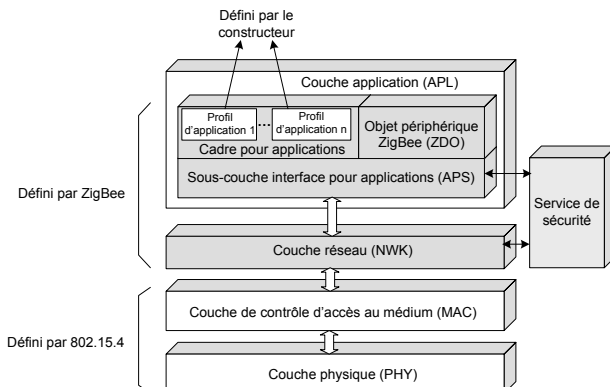
Bande de fréquences ZigBee	Licence	Région	Débit	Canaux
868, 3 MHz	Sans : ISM	Europe	20 kbit/s	0
902-928 MHz	Sans : ISM	Amérique du nord	40 kbit/s	1-10
2405-2480 MHz	Sans : ISM	Monde	250 kbit/s	11-26

UMLV-M2 Réseaux sans fil S. Lohier 131



WPAN Architecture ZigBee

- ZigBee s'appuie sur la spécification IEEE 802.15.4 pour les couches basses.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

133

WPAN ZigBee : services couverts

- Services couverts par ZigBee :
 - définit la couche application (APL : *Application Layer*) et la couche réseau (NWK : *Network layer*), associées à un ensemble de mécanismes de sécurité ;
 - fournit un module de sécurité comprenant notamment le cryptage AES128. (l'intégration du cryptage AES128 au niveau de la couche réseau évite d'avoir à échanger les clés de sécurité via le réseau) ;
 - introduit le concept de profil sur le même principe que Bluetooth : ZigBee définit des profils d'application permettant l'interopérabilité entre différents appareils certifiés ZigBee.
 - Par exemple, le profil ZigBee "Lighting" définit tous les protocoles permettant à un interrupteur ZigBee de fonctionner correctement avec des lampes ZigBee fabriquées par d'autres constructeurs.
- Services couverts par IEEE 802.15.4 :
 - définit la couche d'accès au médium radio (MAC) et la couche physique (PHY) ;
 - protocole simple d'échange de paquet de données avec adressage source vers destination ;
 - détection d'erreur ;
 - protection contre les interférences..

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

134

WPAN ZigBee : la couche application

- La couche **application** (APL : *Application Layer*) A est divisée en trois entités :

- La sous-couche interface pour applications (APS : *Application Support Sublayer*) chargée de :
 - ✓ gérer le transfert des messages entre les périphériques ;
 - ✓ maintenir les correspondances des messages de différents périphériques en fonction de leurs services et de leurs besoins ;
 - ✓ de gérer la sécurité au niveau applicatif en liaison avec le module de service de sécurité ;
- Le support d'application (AF : *Application Framework*) qui sert de cadre pour accueillir les différents profils d'applications définis par le constructeur ;
- Le module objet de périphérique ZigBee (ZDO : *ZigBee Device Object*) dont la fonction est de :
 - ✓ définir le rôle du périphérique au niveau du réseau (coordonateur ZigBee ou périphérique terminal) ;
 - ✓ initier et/ou répondre aux requêtes d'association ;
 - ✓ découvrir les périphériques sur le réseau et déterminer quels services ils produisent ;
 - ✓ établir une relation sécurisée entre les périphériques du réseau.

UMLV-M2

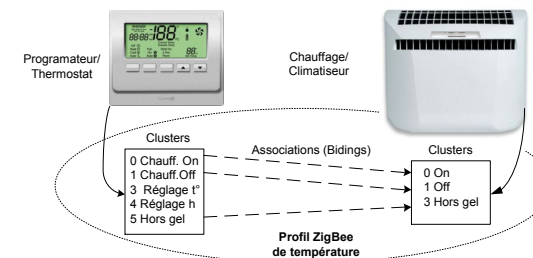
Réseaux sans fil

S. Lohier

135

WPAN ZigBee : exemple de profils d'application

- Les clusters sont des éléments du profil, identifiés par un identificateur de cluster qui est associé aux données sortantes ou entrantes des équipements ZigBee.
- Ces identificateurs sont uniques pour un profil donné.
- Les décisions d'association (*bindings*) sont prises en faisant correspondre un identificateur de cluster sortant à un identificateur de cluster entrant, les 2 faisant partie du même profil.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

136

WPAN

ZigBee : la couche réseau

- La couche **réseau** (NWK : *Network layer*) intègre les différents mécanismes :
 - association et désassociation du réseau ;
 - découverte et maintenance des routes entre les périphériques ;
 - découverte des voisins à un saut ;
 - mise en place de la sécurité sur les paquets ;
 - initiation du réseau et assignation des adresses aux nouveaux périphériques dans le cas particulier où le périphérique est un coordinateur ZigBee.
- Trois rôles possibles pour chaque équipements ZigBee en fonction des besoins de l'application et de ses propres capacités :
 - **Coordinateur ZigBee (ZC)**
 - ✓ Un coordinateur nécessaire pour chaque réseau ZigBee
 - ✓ Initie la formation du réseau
 - **Routeur ZigBee (ZR)**
 - ✓ Participe au routage multi-saut (multihop)
 - **Périphérique de fin ZigBee (ZED)**
 - ✓ Ne permet pas l'association ou le routage
 - ✓ Permet des solutions à très faibles coûts

UMLV-M2

Réseaux sans fil

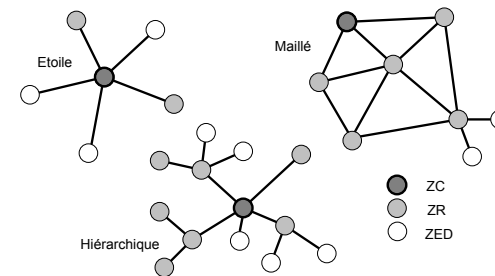
S. Lohier

137

WPAN

ZigBee : les topologies

- Suivant les connexions entre les équipements (ZC, ZR ou ZED) trois topologies possibles :
 - en étoile (star) ;
 - hiérarchique en cluster (cluster tree) ;
 - maillée (mesh).



UMLV-M2

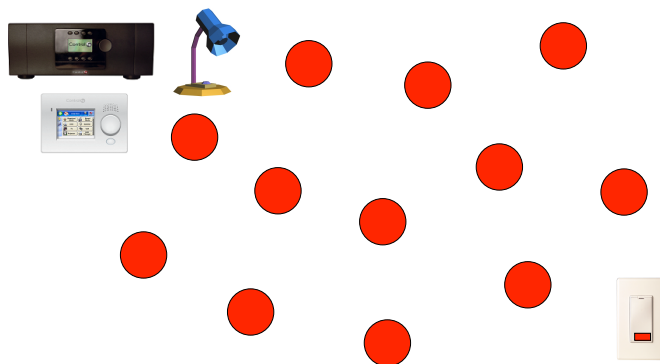
Réseaux sans fil

S. Lohier

138

WPAN

ZigBee : exemple de réseau maillé



UMLV-M2

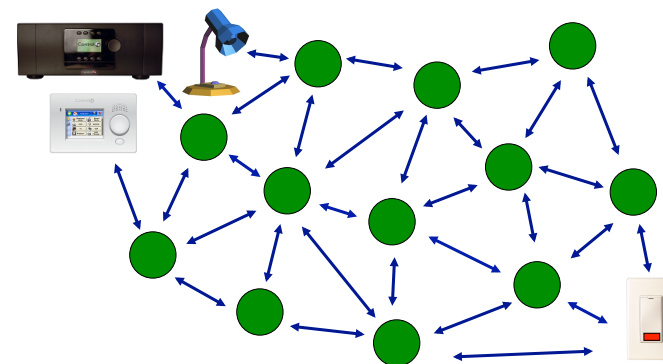
Réseaux sans fil

S. Lohier

139

WPAN

ZigBee : auto-découverte du réseau

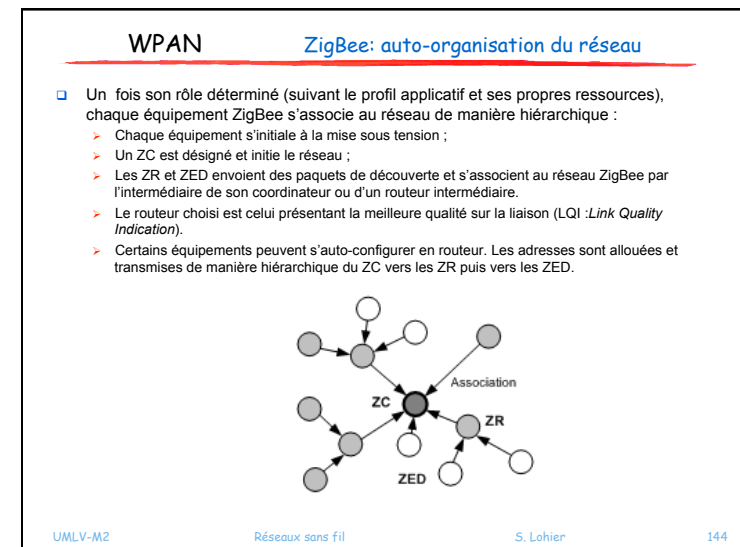
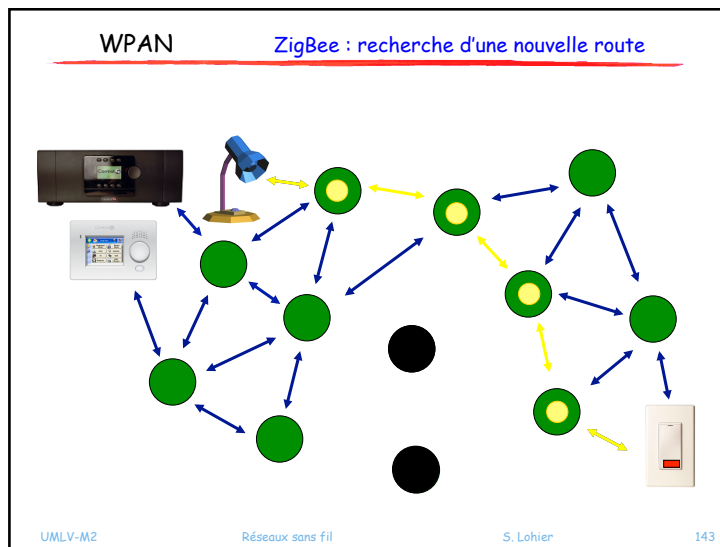
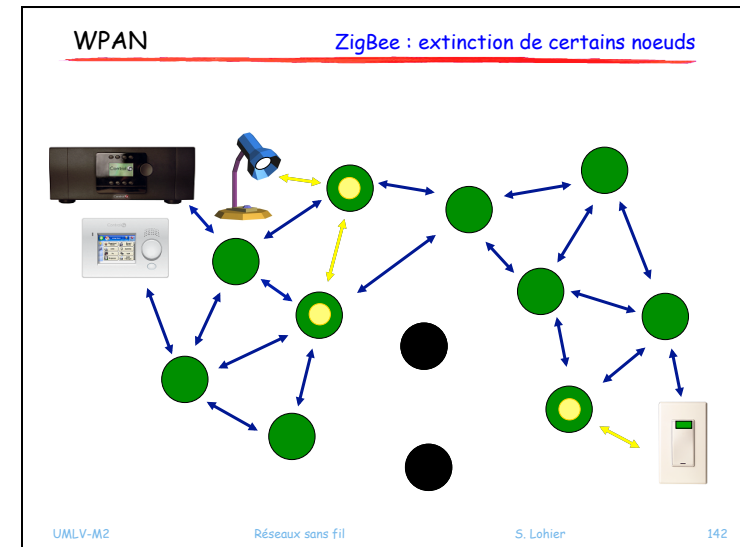
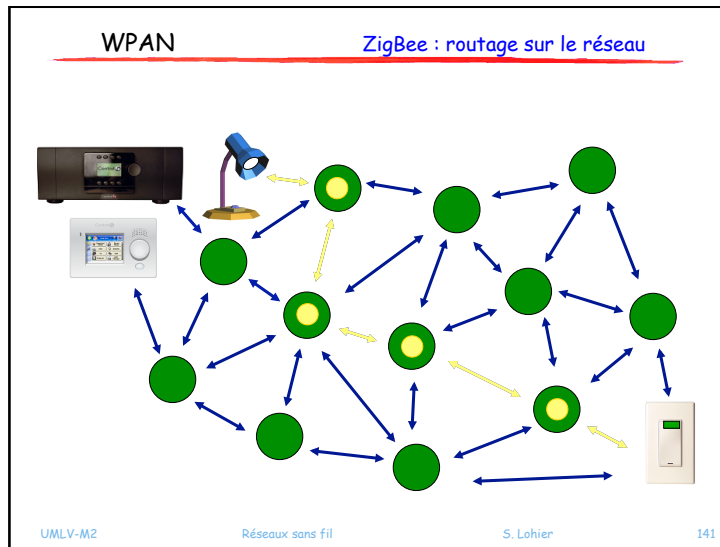


UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

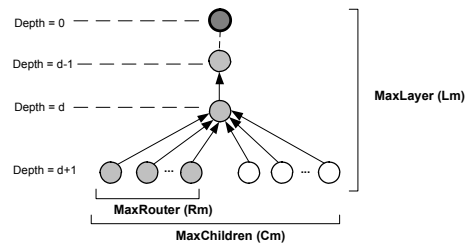
140



WPAN

ZigBee : hiérarchie du réseau

- Trois paramètres sont utilisés pour définir la profondeur du réseau (le nombre maximum de sauts en partant du coordinateur), le nombre maximum de chaque type (ZC, ZR et ZED) et l'assignation des adresses :
 - MaxLayer (L_m) : spécifie la profondeur (*depth*) maximum du réseau ZigBee.
 - MaxChildren (C_m) : définit le nombre maximum d'enfants de type ZR ou ZED qu'un parent peut avoir.
 - MaxRouters (R_m) : définit le nombre maximum d'enfants de type ZR qu'un parent peut avoir.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

145

WPAN

ZigBee : calcul d'adresse

- A partir de L_m , C_m et R_m , une fonction $Cskip(d)$ est utilisée pour calculer le décalage entre deux adresses de routeurs enfant.
- $Cskip(d)$ correspond à la taille du sous bloc d'adresse qui sera assigné par chaque parent à ses enfants routeurs.

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + C_m \cdot (L_m - d - 1), & \text{si } R_m = 1 \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m \cdot R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m}, & \text{sinon} \end{cases}$$

- Un parent assigne une adresse à son premier enfant en incrémentant de 1 sa propre adresse.
- Les adresses des enfants routeur suivants seront séparées d'une valeur égale à $Cskip(d)$.
- Pour les enfants non routeurs, la $n_{i\text{ème}}$ adresse sera calculée comme suit :

$$A_n = A_{\text{parent}} + Cskip(d) \cdot R_m + n$$

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

146

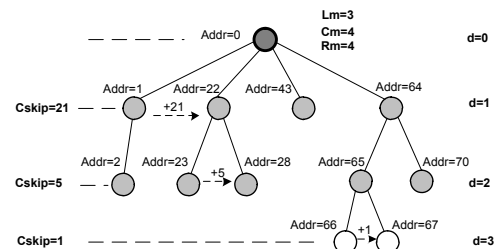
WPAN

ZigBee : exemple d'adressage

- Avec les paramètres suivants : $L_m = 3$; $C_m = 4$ et $R_m = 4$, la valeur de la fonction $Cskip(d)$ peut être calculée pour les différentes profondeurs :

Depth d	0	1	2	3
$Cskip(d)$	21	5	1	0

- Si un périphérique ZigBee obtient une valeur nulle de $Cskip(d)$, cela signifie qu'il n'est pas capable, à cette profondeur, d'accepter des enfants et sera donc forcément un ZED.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

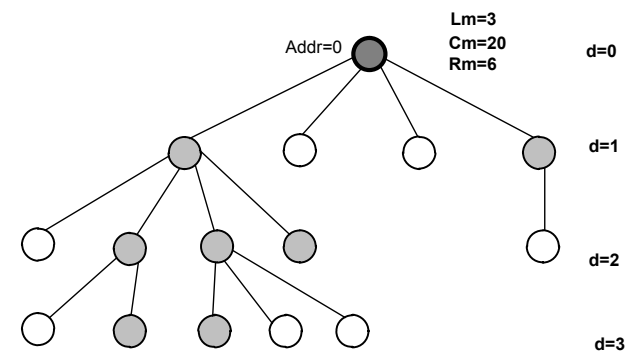
S. Lohier

147

WPAN

ZigBee : autre exemple d'adressage

- Question : quelles sont les adresses ZigBee des équipement sachant que sur un niveau donné, les adresses sont d'abord distribuées aux routeurs ?



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

148

WPAN

Routage dans ZigBee

Trois méthodes de routage :

- Routage direct (no routing)** : dans une topologie en étoile, le ZC connaît tous ses ZED et communique directement avec eux
- Routage hiérarchique** ou arborescent : dans une topologie en arbre, tout nœud a au plus un père (tous en ont un et un seul sauf le coordinateur). Le routage utilise la structure arborescente défini lors de l'attribution des adresses.
 - Avantage : rapide et pas de table de routage à gérer.
 - Inconvénient : les messages à destination d'une autre branche passent par le ZC.
- Routage réactif** de type AODV : un paquet de découverte de route est envoyé en diffusion par l'émetteur, le récepteur répond et la route est tracée.
 - Avantage : les chemins directs sont possible
 - Inconvénient : beaucoup de paquets échangés et des tables de routage à gérer.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

149

WPAN

Structure des paquets ZigBee

- Les paquets ZigBee sont composés d'un en-tête et de la partie « données » provenant de la couche application.
- Le champ de contrôle permet de définir le type de paquet, le protocole réseau, le processus de découverte de route et le type d'adresses utilisées.
- Les autres champs de l'en-tête définissent les adresses source et destination, la portée (nombre de sauts) et un numéro de séquence pour numéroté les paquet émis.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

150

WPAN

ZigBee : la couche MAC 802.15.4

Rôle de la sous-couche MAC 802.15.4 :

- émettre des trames balise (beacon) si le périphérique est un ZC.
- gérer la synchronisation aux trames balise ;
- supporte les association et désassociation au réseau ;
- gérer la méthode d'accès au médium CSMA/CA ;
- gérer le mécanisme de garantie de durée GTS (*Guaranteed Time Slot*) ;
- fournir un mécanisme de transmission fiable (acquittement des trames, retransmission, vérification d'intégrité).

4 types de trames :

- Beacon Frame ;
- Data Frame ;
- Acknowledgment Frame ;
- MAC Command Frame.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

151

WPAN

ZigBee : structure des trames 802.15.4

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

152

WPAN

ZigBee : accès au canal

- Suivant la configuration du réseau, la couche MAC autorise 2 types d'accès :
 - Un réseau sans *beacon* utilisant un mécanisme d'accès CSMA/CA sans slot ;
 - ✓ Dans ce cas, les trames de données sont transmises lorsque le périphérique ZigBee obtient le canal.
 - Un réseau avec *beacon* utilisant un mécanisme d'accès CSMA/CA avec slot ;
 - ✓ Dans ce cas, les données sont transmises entre 2 beacons dans des slots de temps.
 - ✓ La super-trame (superframe) comprise entre 2 beacons permet de définir ces différents slots.
 - ✓ Sa structure est décidée par le coordinateur (ZC).
 - ✓ Deux périodes de transmission des données possibles :
 - Période avec contentions (CAP) : les périphériques ZigBee sont en compétition pour accéder au canal suivant la méthode CSMA/CA
 - Période sans contentions (CFP) : certains périphériques (faible batterie, priorités...) ont acquis le droit de transmettre sur des slots garantis de la trame (GTS)

UMLV-M2

Réseaux sans fil

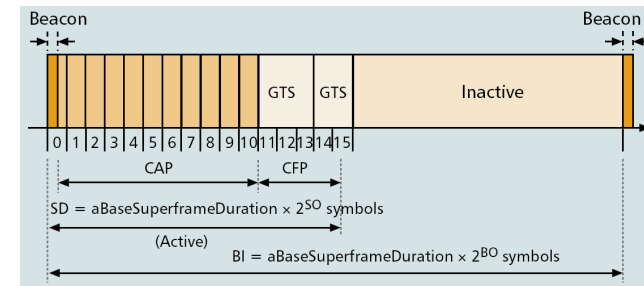
S. Lohier

153

WPAN

ZigBee : superframe 802.15.4

CAP: Contention Access period
 CFP: Contention Free Period
 GTS: Guaranteed Time Slots
 SD: Superframe Duration
 BI: Beacon Interval
 BO/SO: Beacon/Superframe Order



UMLV-M2

Réseaux sans fil

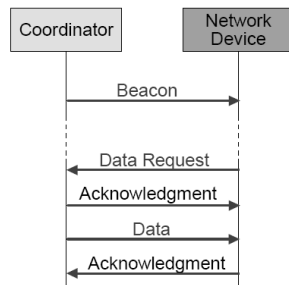
S. Lohier

154

WPAN

ZigBee : transmission 802.15.4 ZC → ZED

- Le coordinateur a des données à transmettre au périphérique.
- Il envoie un beacon avec l'adresse du périphérique.
- Le périphérique à l'écoute décode son adresse et transmet une demande de données.
- Le coordinateur après acquittement envoie les données au périphérique.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

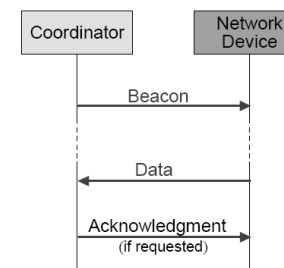
S. Lohier

155

WPAN

ZigBee : transmission 802.15.4 ZED → ZC

- Le périphérique a des données à transmettre au coordinateur.
- Le périphérique est à l'écoute des beacons.
- A réception d'un beacon, il se synchronise sur la superframe.
- Suivant ses prérogatives, le périphérique transmet ses données dans les slots CPA ou CFP.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

156

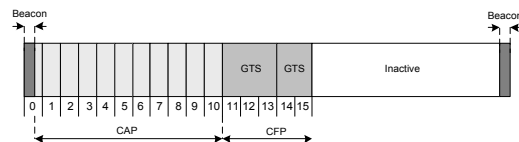
- ❑ Le standard 802.15.4 propose deux couches physique (PHY) fonctionnant sur deux bandes de fréquences distinctes : 868/915 MHz et 2,4 GHz.
- ❑ Les principales fonction de la couche PHY sont :
 - Activation et désactivation de l'interface radio ;
 - Détection d'énergie (ED: *Energy detection*) ;
 - Mesure de la qualité de la liaison (LQI: *Link quality indication*) ;
 - Estimation de disponibilité du canal (*Clear Channel Assessment*) ;
 - Émission et réception des données (PSDU).

- ❑ Suivant les bandes de fréquence utilisée, les modulations sont de type BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) ou O-QPSK (*Orthogonal - Quadrature Phase Shift Keying*)

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902-928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (optional)	868-868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902-928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (optional)	868-868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary Orthogonal
	902-928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

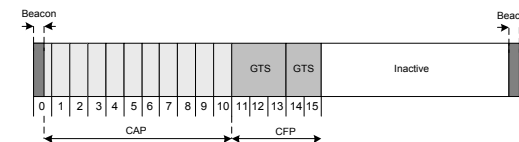
Questions sur ZigBee

La figure suivante montre la structure d'une super trame ZigBee.
A quoi correspondent les différentes périodes CAP (*Contention Access Period*), CFP (*Contention Free Period*), GTS (*Garanteed TimeSlot*) et Inactive ?



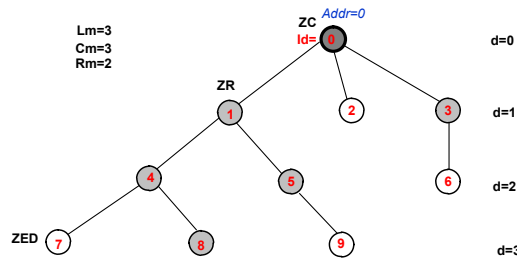
Questions sur ZigBee

Les méthode d'accès de type CSMA/CA utilisées dans les technologies ZigBee et Wifi sont-elles comparables ?



Questions sur ZigBee

Calculez pour la topologie hiérarchique représentée ci-dessous les valeurs des adresses ZigBee (les chiffres représentent les identifiants des nœuds).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

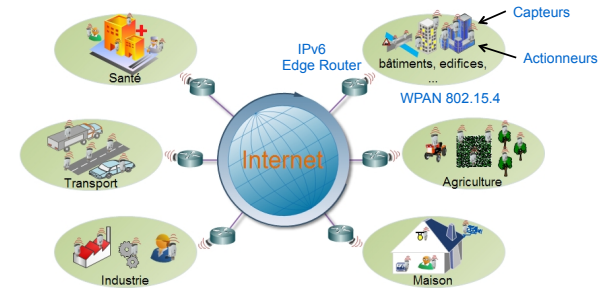
S. Lohier

161

WPAN

6LoWPAN

- 6LoWPAN est l'acronyme de *IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks*.
- Le groupe de travail 6LoWPAN a défini les mécanismes d'*encapsulation*, de *fragmentation* et de *compression* d'en-têtes permettant aux paquets IPv6 d'être envoyés ou reçus sur des réseaux IEEE 802.15.4.
- L'objectif à large échelle est de pouvoir adresser les capteurs ou les actionneurs des réseaux 802.15.4 qui seront « vus » alors comme des objets de l'internet : « Internet of the Things » (IoT).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

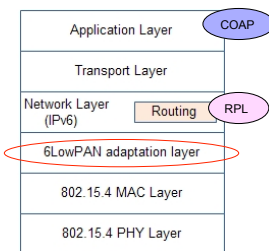
S. Lohier

162

WPAN

Pile 6LoWPAN

- 6LoWPAN définit une couche d'adaptation sur la passerelle et sur les capteurs pour pouvoir adresser ceux-ci à partir de n'importe quel PC comme des « objets » IPv6.
- Des protocoles spécifiques sont développés :
 - COAP (*Constrained Application Protocol*) est destiné à gérer la communication avec les capteurs et les actionneurs à ressources réduites en minimisant les messages. Les commandes/réponses COAP peuvent être simplement traduites en commandes/réponses HTTP ;
 - RPL (*Routing Protocol for Low power and Lossy Networks*) est un protocole de routage IPv6 à vecteur de distance économe en mémoire et en énergie.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

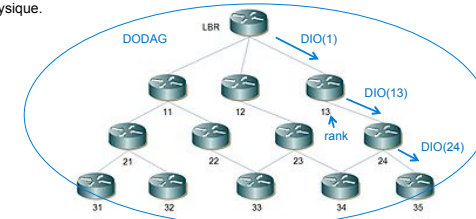
S. Lohier

163

WPAN

Routage 6LoWPAN

- RPL construit entre les équipements un graphe de type DAG (DAG: *Directed Acyclic Graph*).
- Le routeur de bord LBR (*Low power and lossy network Border Router*) est à la racine du graphe.
- Le LBR de rang 1 et tous les équipements de rang supérieur forment un DODAG (*Destination Object DAG*).
- Le LBR émet périodiquement en multicast des DIO (*DODAG Information Object*) pour mettre à jour le graphe. Le DIO contient notamment le rang de l'émetteur.
- Lorsqu'un équipement reçoit une nouvelle version de DIO, il calcule son rang, choisit son parent et propage son DIO.
- Vu d'un équipement, tous les équipements possédant un rang inférieur peuvent prétendre être parents.
- Les routes optimales (« parents ») au sein du graphe sont obtenues à partir de métriques (par exemple le délai) et de contraintes (par exemple les liens non cryptés). Il peut donc y avoir plusieurs DODAG pour un réseau physique.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

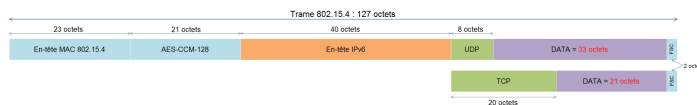
S. Lohier

164

WPAN

Encapsulation 6LowPAN

- ❑ **Problème** : en 802.15.4, la taille maximale du PSDU est de 127 octets.
 - Avec les 25 octets de la sous-couche MAC, il reste 102 octets au niveau liaison.
 - En ajoutant la sécurisation de la couche de liaison de données (AES-CCM-128), il ne reste que 81 octets disponibles au niveau IP.
 - La surcharge due aux en-têtes d'IPv6 est de 40 octets (auxquels il faudrait ajouter des éventuels en-têtes d'extension).
 - Il faut rajouter les en-têtes au niveau transport : UDP (8 octets) ou TCP (20 octets).
 - Finalement les données utiles sont peu élevées (33 octets sur UDP et 21 sur TCP) et ne permettent pas de respecter les spécifications d'IPv6 qui imposent un MTU minimal de 1280 octets.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

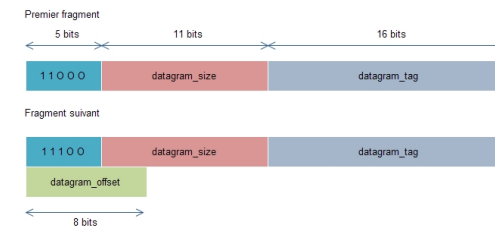
S. Lohier

165

WPAN

Fragmentation 6LowPAN

- ❑ **Solution** : la couche adaptation 6LowPAN doit fragmenter les paquets IPv6 avant de les envoyer et les ré-assembler à la réception.
- ❑ Chaque fragment est précédé d'un en-tête de fragmentation de 4 ou 5 octets qui contient les informations suivantes :
 - 5 bits pour *dispatch* : permet d'identifier qu'il s'agit d'un fragment. Le premier fragment aura la valeur « 11000 » et les suivants « 11100 » ;
 - 11 bits pour *datagram_size* : taille du paquet IP avant fragmentation ;
 - 16 bits pour *datagram_tag* : identifiant commun à tous les fragments d'un même paquet IP ;
 - 8 bits pour *datagram_offset* : position du fragment dans le paquet IP (uniquement présent dans les fragments suivant le premier).



UMLV-M2

Réseaux sans fil

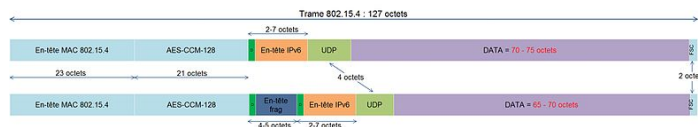
S. Lohier

166

WPAN

Compression 6LowPAN

- ❑ **Autre solution** : la couche adaptation 6LowPAN intègre des mécanismes de compression des en-têtes IPv6 et UDP.
- ❑ L'en-tête IPv6 peut être réduit à 2 octets sur des liens locaux ou à 7 octets pour des communications nécessitant plusieurs sauts.
- ❑ L'en-tête UDP peut être réduit à 4 octets en limitant à 4 bits la taille des ports (61616 à 61631).
- ❑ Finalement, la charge utile peut être de 70 à 75 octets dans le meilleur des cas.
- ❑ En rajoutant les informations de fragmentation elle passe à 65-70 octets.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

167

WPAN

ZWave

- ❑ Protocole radio de faible puissance conçu pour la domotique (éclairage, chauffage, sécurité...).
- ❑ Echanges à faible débit (9 et 40 kbps) et des appareils sur pile ou alimentés électriquement
- ❑ Gamme de fréquences : 868 MHz en Europe, 908 MHz aux US.
- ❑ Portée : environ 50 m (davantage en extérieur, moins en intérieur).
- ❑ La technologie maillée (*mesh*) pour augmenter la portée et la fiabilité.
- ❑ Plus de 100 fabricants regroupés au sein de l'Alliance Z-Wave.



UMLV-M2

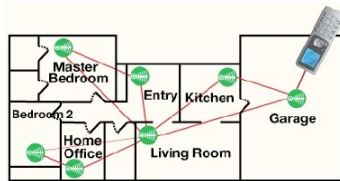
Réseaux sans fil

S. Lohier

168

WPAN Topologie ZWave

- Les modules présents dans le réseau sont appelés des nœuds du réseau. Chaque nœud a la possibilité d'agir de manière indépendante sur ce réseau maillé (mesh).
- Chaque réseau est associé un contrôleur qui définit l'identifiant (*net_id*) du réseau sur 32 bits.
- Un réseau peut admettre 232 nœuds avec la possibilité de mettre une passerelle entre les 2 réseaux Z-Wave pour obtenir plus d'éléments.
- La topologie permet du multi-saut, par exemple une télécommande qui commande une deuxième prise relayée par la première.
- Dans le cas du multi-saut, la route est indiquée par la source (*source routing*).
- La fonctionnalité *mesh* permet de ne pas définir une topologie de départ, celle-ci se construit au fur et à mesure de la densification des éléments du réseau.



UMLV-M2

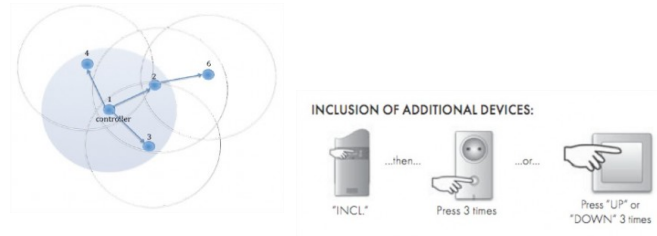
Réseaux sans fil

S. Lohier

169

WPAN Protocole ZWave

- Le protocole Zwave définit les couches radio, mais également les couches applicatives, ce qui permet l'interopérabilité des équipements.
- Pour faciliter l'interopérabilité, le protocole permet de préciser le type d'équipement avec la notion de classes (exemples : binary switch, binary sensor, multilevel sensor, multilevel motor, thermostat, alarm, ...).
- Chaque module Z-Wave est reconnu sur le réseau par un code unique sur 8 bits attribué par le contrôleur auquel il est associé.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

170

WPAN Méthode d'accès Zwave

- Quand un élément souhaite émettre il n'y a pas de temps de connexion au réseau : l'élément reste dans le réseau à partir du moment où il y a été installé.
- La méthode d'accès est du type LBT (*Listen before Talk*) : avant de commencer à émettre, un élément écoute le trafic en cours afin de ne pas effectuer de collision sur le réseau avec un autre message (idem CSMA).
- S'il n'y a pas de trafic à cet instant, il peut émettre immédiatement.
- Les transferts de données sont acquittés par le destinataire : le destinataire envoie un accusé réception à l'émetteur de chaque message.
- L'absence d'acquiescement d'un message entraîne sa retransmission.
- Un message non acquitté est retransmis 2 fois avant de statuer l'abandon.
- Ces retransmissions sont très rapprochées dans le temps (<0,1s) de sorte qu'un abandon est rapidement statué en cas d'échecs successifs.
- L'émetteur, s'il possède cette opportunité, va essayer alors de prendre successivement d'autres chemins pour joindre le destinataire avec à chaque fois la même attente d'acquiescement.
- Par exemple avec 5 chemins, 15 trames seront ainsi émises.
- La modulation de signal utilisée est de type GFSK (*Gaussian Frequency-shift keying*)

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

171

WMAN Présentation de WiMAX

- WiMAX** (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) est une norme basée sur le standard de transmission radio IEEE 802.16.
- Le standard 802.16 permet d'émettre et de recevoir des données dans les bandes de fréquences radio de 2 à 66 GHz avec un débit maximum théorique de 70 Mbps sur une portée de 50 km.
- En théorie : 70 Mb/s en ligne de vue (LOS : *Line Of Sight*) sur une portée de 50Km
- En pratique : 12 Mb/s sur une portée de 20 Km ou 8 Km s'il y a des obstacles (NLOS : *No Line Of Sight*) .



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

172

WMAN WiMAX fixe et mobile

- Les révisions du standard IEEE 802.16 se déclinent en deux catégories :
 - WiMAX fixe**, également appelé **IEEE 802.16-2004**, est prévu pour un usage fixe avec une antenne montée sur un toit, à la manière d'une antenne TV. Le WiMAX fixe opère dans les bandes de fréquence 2.5 GHz et 3.5 GHz, pour lesquelles une licence d'exploitation est nécessaire, ainsi que la bande libre des 5.8 GHz.
 - WiMAX mobile** (en anglais portable WiMAX), également baptisé **IEEE 802.16e**, prévoit la possibilité de connecter des clients mobiles au réseau Internet. Le WiMAX mobile ouvre ainsi la voie à la téléphonie mobile sur IP ou plus largement à des services mobiles haut débit.

	802.16	802.16a	802.16-2004	802.16e
Bande de fréquence utilisée	10 à 66 GHz	2 à 11 GHz	2 à 11 GHz	< 6 GHz
Débit théorique de données	32 à 134 Mbps	70 Mbps	70 Mbps	15 Mbps
Portée	Jusqu'à 50 Km dans certaines conditions (débit limité, ligne de vue directe Dans un contexte de ligne de vue non directe, la portée peut atteindre jusqu'à 5 Km			
Architectures naturelles	Point-à-multipoint			
Mode de fonctionnement	Technologies utilisables en mode outdoor ou indoor en fonction de la norme (802.16-2004 pour l'indoor).			

UMLV-M2

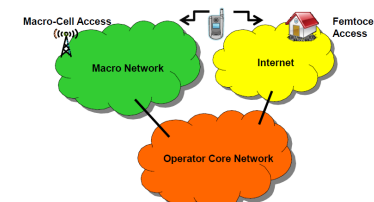
Réseaux sans fil

S. Lohier

173

WMAN WiMAX-2

- La dernière norme 802.16m doit succéder 802.16e et permet des débits théoriques descendants de plus de 300 Mbit/s.
- Le 802.16m est également connu sous le nom WirelessMAN-advanced ou WiMax-2.
- Le nouveau standard a mis plus de 4 ans avant d'aboutir et arrive dans un contexte très concurrentiel.
- Une grande majorité d'opérateurs a choisi le LTE pour construire leur réseau de 3,75 G (ou LTE-Advanced pour la 4G).
- Le 802.16m combine les dernières technologies permettant d'augmenter le débit :
 - Multiplexage OFDMA ;
 - Antennes MIMO ;
 - Utilisation de femtocells.



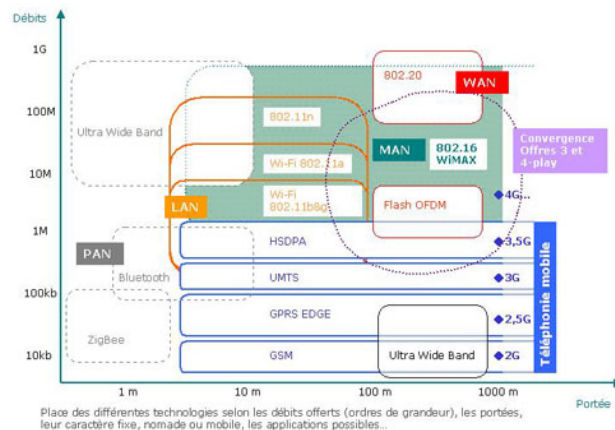
UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

174

WMAN WiMAX et les autres technologies (2)



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

175

WMAN Applications du WiMAX (1)

- Fourniture d'accès haut débit à Internet auprès des utilisateurs finaux :
 - Couverture de la zone dite du « dernier kilomètre » (*last mile*), encore appelée BLR (Boucle Locale Radio).
 - accès Internet haut débit aux zones non couvertes par les technologies filaires classiques (lignes ADSL, câble ou lignes spécialisées...).
 - WiMAX = « ADSL sans fil »
 - Mise en oeuvre du standard 802.16-2004, qui supporte les transmissions indoor.
- WiMAX comme réseau de collecte (*backbone*) entre des réseaux locaux sans fil :
 - possibilité de relier entre eux différents *hotspots* Wi-Fi afin de créer un réseau maillé (*mesh network*).
 - déploiement de réseaux métropolitains.
- Établissement de liaisons en mobilité (802.16e) pour les utilisateurs disposant d'ordinateurs portables ou de PDA (vitesse jusqu'à 120 Km/h).

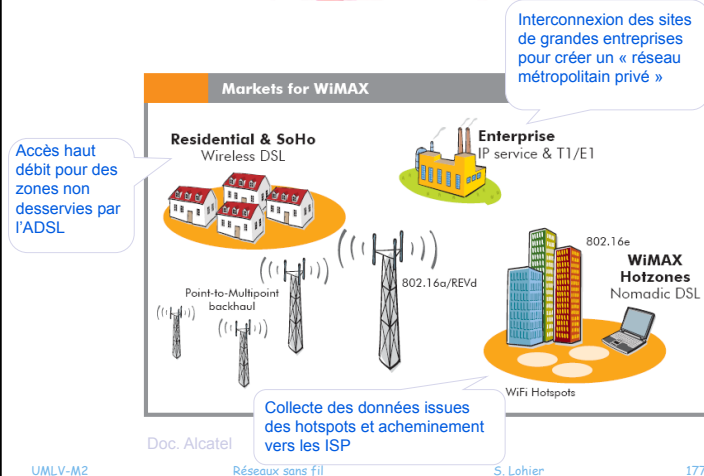
UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

176

Applications du WiMAX (2)



UMLV-M2

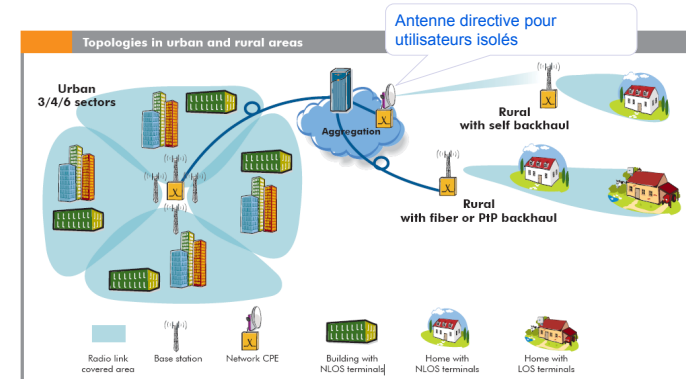
Réseaux sans fil

S. Lohier

177

WMAN

Topologies dans les milieux urbains et ruraux



UMLV-M2

Réseaux sans fil

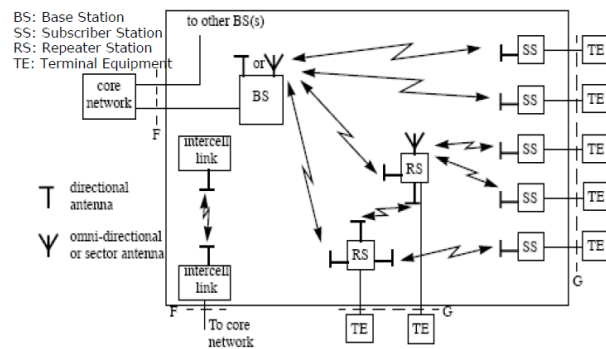
S. Lohier

178

WMAN

Architecture de WiMAX

- Comme pour WiFi, la technologie WiMAX est organisée autour de la station de base, c'est-à-dire l'antenne centrale chargée de communiquer avec les antennes d'abonnés (*subscribers antennas*).
- **Architecture Point-To-Multipoint** (P2MP) : 1 antenne émettrice, n antennes réceptrices.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

179

WMAN

Caractéristiques techniques de WiMAX

- ❑ **Bande de fréquence** suivant la ligne de vue et la mobilité :
 - bande 10-66 GHz en vue directe (LOS : *Line Of Sight*) ;
 - bande 2-11 GHz en vue cachée (NLOS : *No Line Of Sight*) ;
 - bande 2-6 GHz en mobilité.
- ❑ Mécanisme d'allocation de bande passante à la demande (*Grant/Request Access*).
- ❑ Bande passante ajustée en fonction de la qualité de la liaison radio et de la distance (132 Mbps à 10 km par exemple).
- ❑ Largeur de bande des canaux : 20 & 25 MHz (US) et 28 MHz (EU).
- ❑ Multiplexage de type **TDM** (*Time Division Multiplexing*), ce qui permet d'allouer dans une trame, une « tranche de temps (*slot time*) » à chaque utilisateur .
- ❑ Multiplexage en fréquence de type **OFDM** (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).
- ❑ Mécanismes de corrections d'erreurs et de requêtes automatiques de renvoi de paquets (ARQ: *Automatic Repeat Request*).

UMLV-M2

Réseaux sans fil

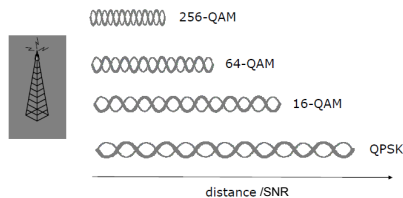
S. Lohier

180

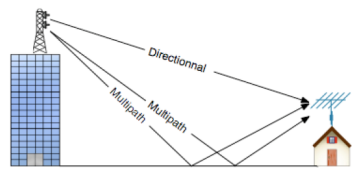
WMAN

Caractéristiques techniques de WiMAX (2)

- Modulation de type PSK adaptative en fonction du SNR :



- Exploitation des trajets multipath avec plusieurs antennes et un multiplexage OFDM.



UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

181

WMAN

WiMAX : bilan

- Difficultés :
 - Équipements fixes disponibles, mobiles beaucoup moins disponibles ;
 - Performances médiocres en *indoor*, mauvaise qualité de téléphonie ;
 - Retard de certification par le Wimax Forum : matériel incompatible ;
 - Concurrence du HSDPA et du LTE (4G) ;
 - Nocivité supposée des ondes.
- En France, le WiMax est principalement exploité pour couvrir les zones blanches, oubliées du haut débit. Seules quelques offres existent, fragmentées sur l'ensemble du territoire. Iliad et Bolloré Telecom sont les seuls opérateurs à détenir une licence nationale.
- En avril 2008, l'ARCEP a exclu le Wimax du marché pertinent du haut et du très haut débit...
- En Europe, le WiMax est principalement utilisé pour des accès fixes. La législation interdit l'usage pour des services de mobilité avant 2015.
- En 2011, l'IEEE a approuvé la norme 802.16m pour la prochaine génération de Wimax.
- Le WiMax 2 devrait être déployé sur les réseaux WiMax déjà existants aux Etats-Unis : Clear et Spring.

UMLV-M2

Réseaux sans fil

S. Lohier

182