

AARE

Les réseaux sans fil

C. Pham

Université de Pau et des Pays de l' Adour

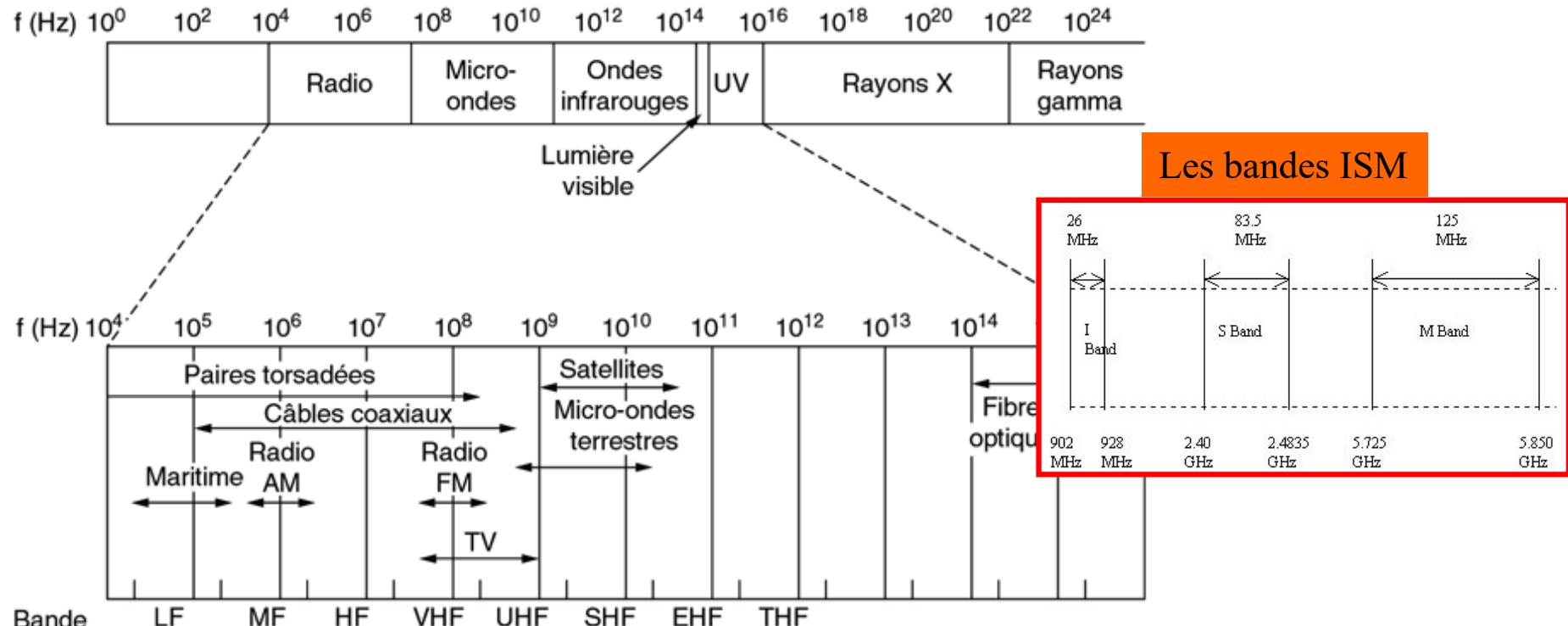
Département Informatique

<http://www.univ-pau.fr/~cpham>

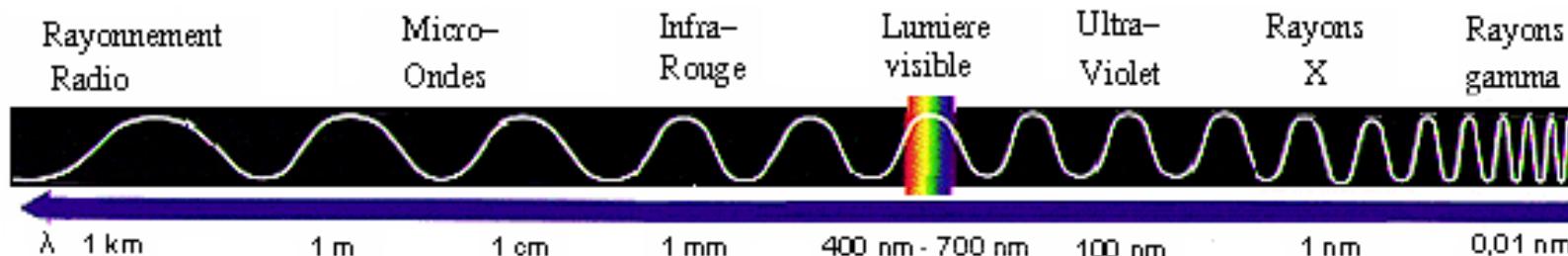
Congduc.Pham@univ-pau.fr



Le spectre électromagnétique



© Pearson Education France



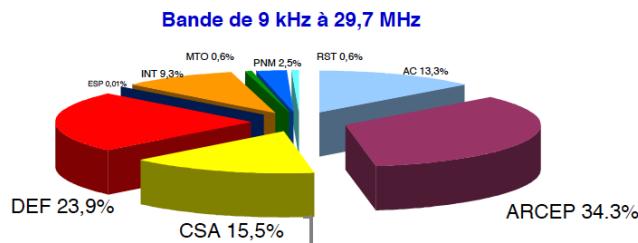
Agence nationale des fréquences (www.afnr.fr)

- **Bandes de fréquences** : attribuées aux différents services de radiocommunication par le **Règlement des radiocommunications** de l'**Union internationale des télécommunications**, élaboré par les conférences mondiales des radiocommunications.
- **En France, les bandes ainsi attribuées sont réparties entre 9 affectataires (7 administrations et 2 autorités indépendantes)**
 - **AC** Administration de l' aviation civile
 - **DEF** Ministère de la défense
 - **ESP** Espace
 - **INT** Ministère de l' intérieur
 - **MTO** Administration de la météorologie
 - **PNM** Administration des ports et de la navigation maritime (ex phares et balises)
 - **RST** Ministère de l' éducation nationale, de la recherche et de la technologie
 - **CSA** Conseil supérieur de l'audiovisuel
 - **ART** Autorité de régulation des Télécommunications

INFO

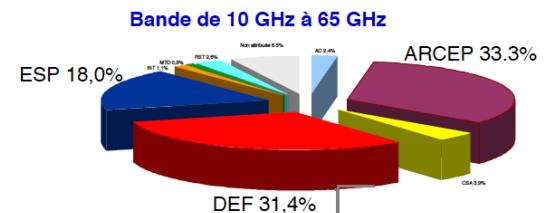


Liaisons HF

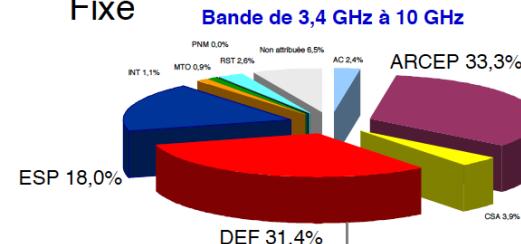


Répartition des attributions de bandes de fréquences entre affectataires à titre primaire dans les principales gammes de fréquences

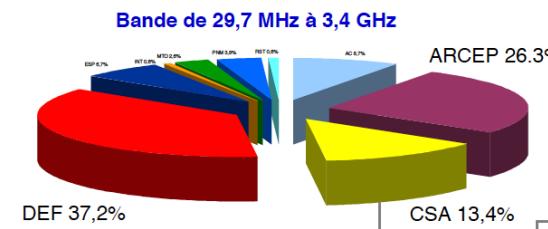
Satellites



Fixe



Mobile,
radiolocalisation
et radiodiffusion



Wireless Communication Essentials

RSF-1

Architecture & Organization

Point d'accès

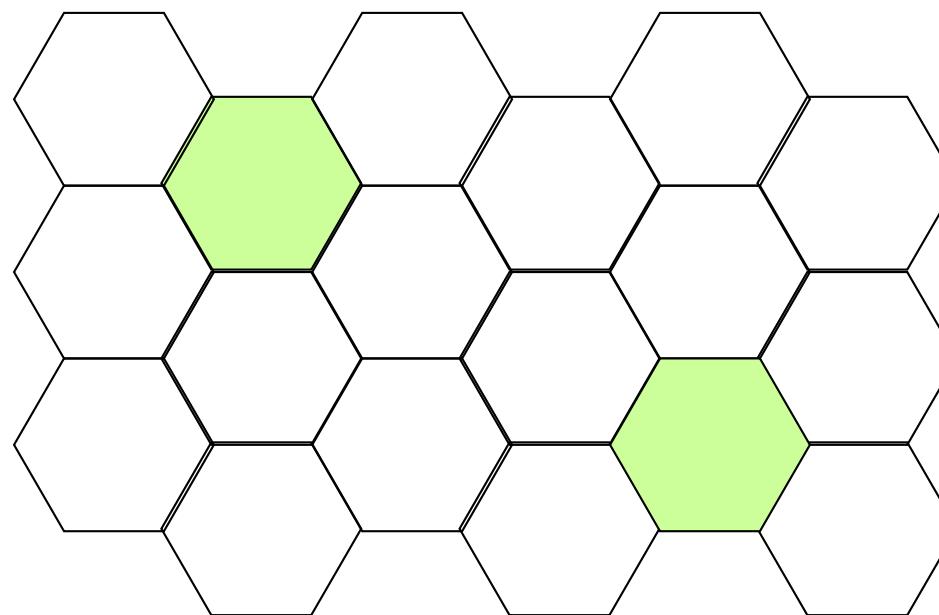
- Liaison réseau filaire - réseau sans fil
- Gère le trafic des mobiles d'une cellule en réception et en transmission de données
- Type de matériel : Station (dédiée de préférence) avec :
 - carte réseau traditionnelle pour le réseau filaire
 - carte émission / réception radio
 - couche logicielle adéquate

Organisation cellulaire

- **Cellule de communication** =
BSS : Basic Set Service
de taille variable :
 - liée à l'environnement
 - liée à la puissance du mobile, car le point d'accès (fixe) dispose à priori d'une source d'énergie suffisante
- **ESS** : Extended Set Service :
plusieurs BSS <=> plusieurs AP (Access Point)

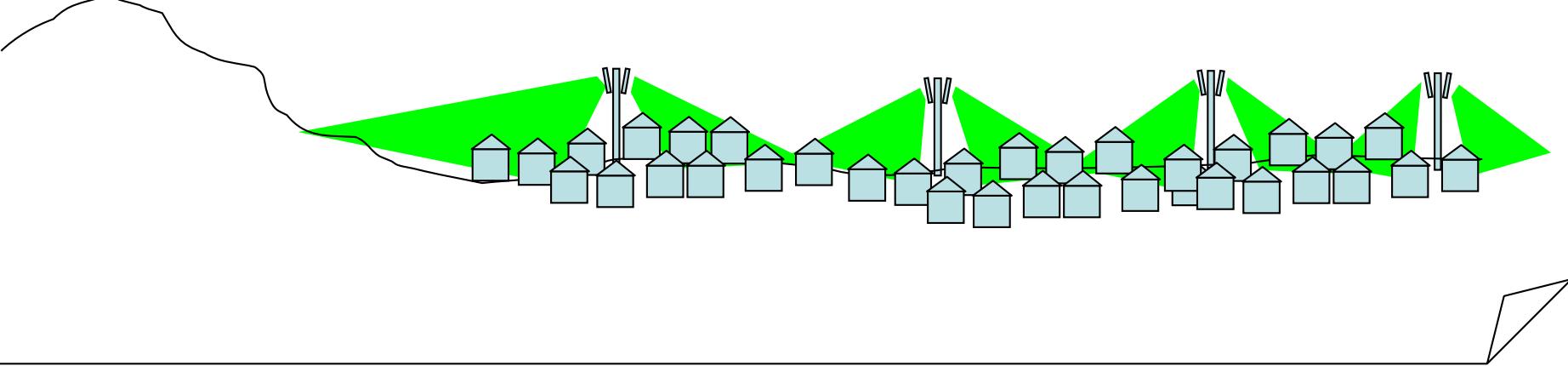
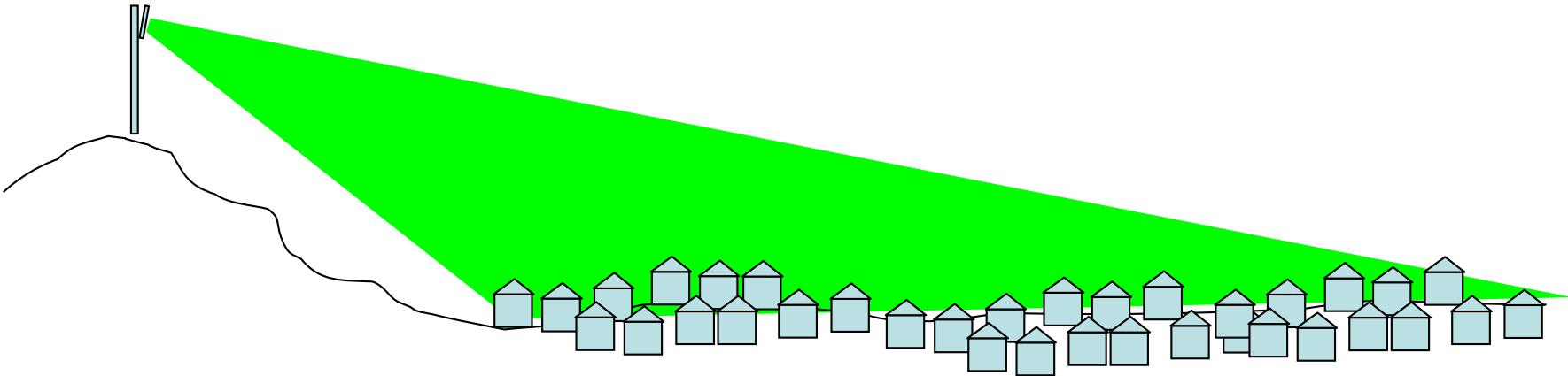
Organisation cellulaire

- Réutilisation de la même fréquence sur des zones géographiques différentes



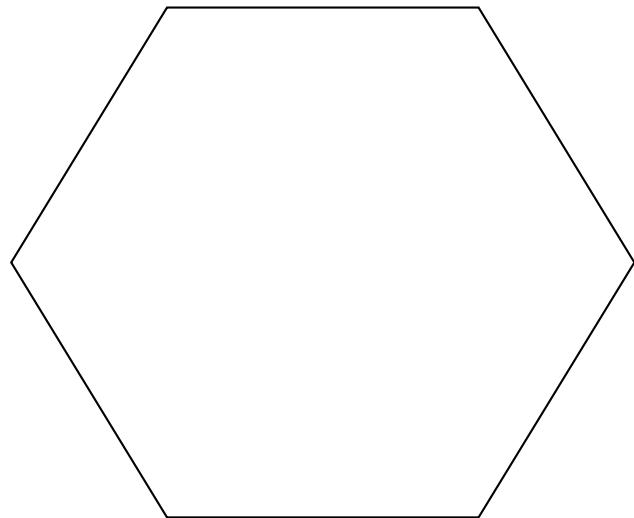
- Avantage : augmentation de la capacité
- Inconvénient : augmentation des interférences

Implantation des antennes



Exemple : couverture d'une zone

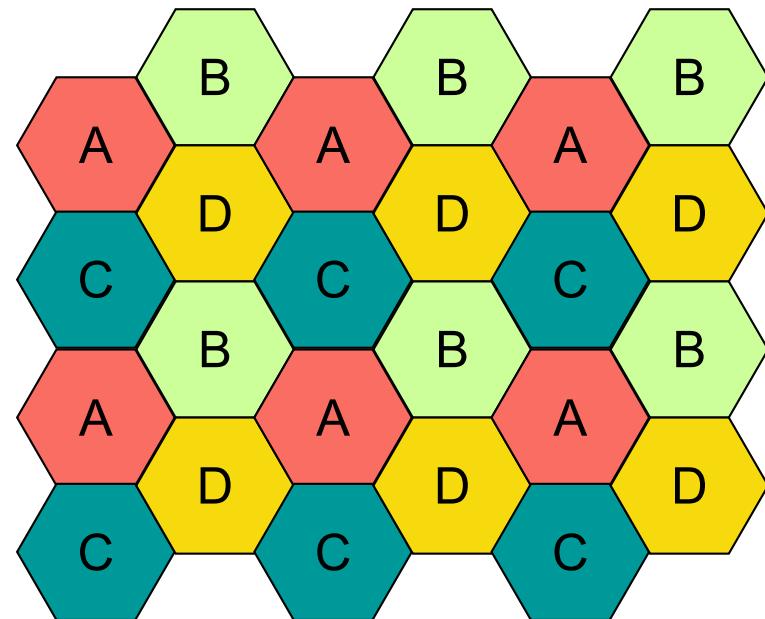
1 cellule



Ex: Bande passante de 100 MHz
200 KHz nécessaire par canal

100MHz pour la cellule
 $100M / 200K = \underline{\text{500 canaux}}$

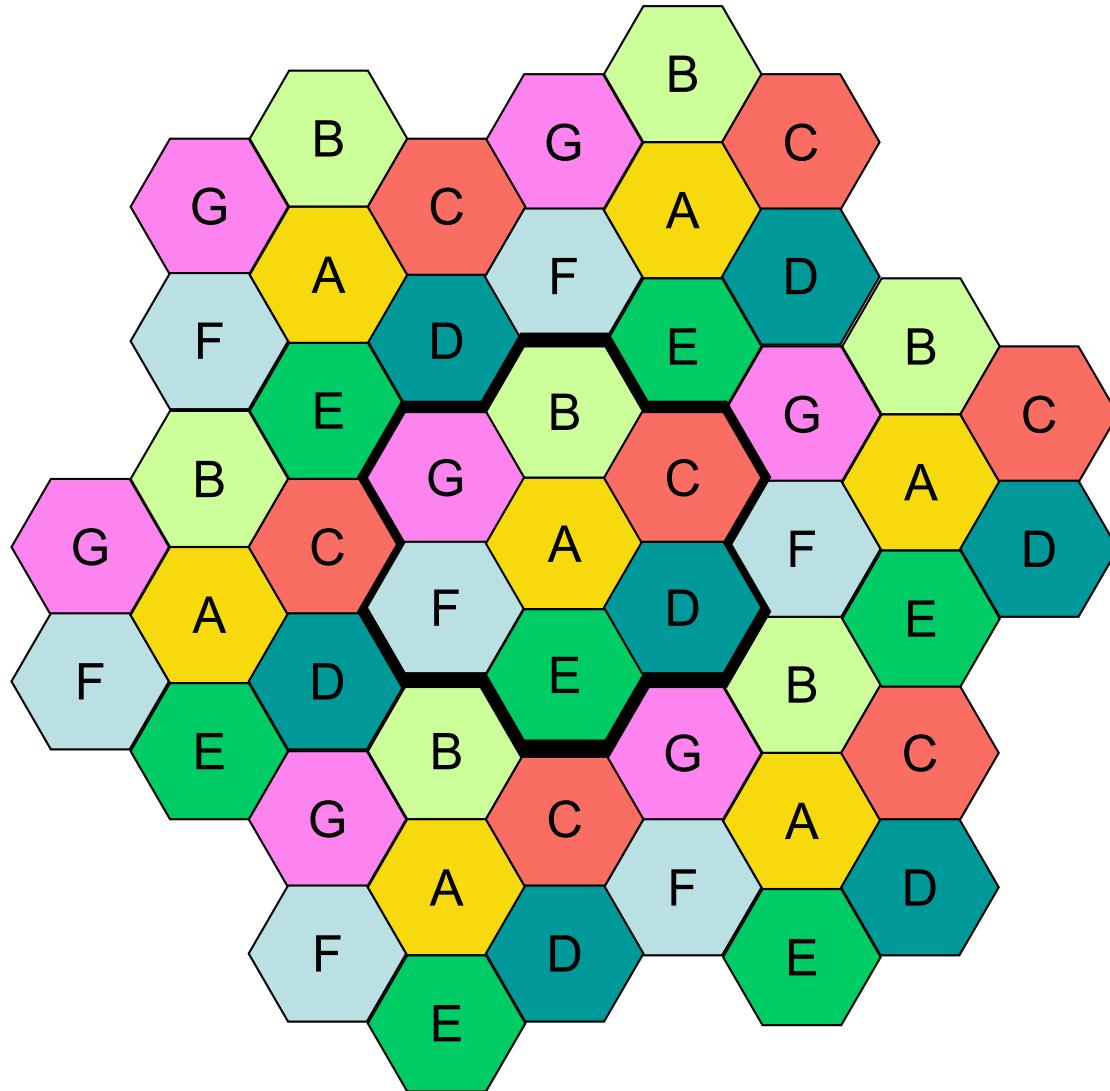
Organisation
en 6 clusters de 4 cellules



$100MHz / 4 cellules = 25 \text{ MHz par cellule}$
 $25M / 200K = 125 \text{ canaux par cellule}$
 $125 \text{ canaux} * 24 \text{ cellules} = \underline{\text{3000 canaux}}$

Gain = nombre de clusters

Exemple en zone urbaine, N=7



Organisation cellulaire

- **Nombre d'utilisateurs :**

$$n = \frac{W}{B} \times \frac{m}{N}$$

avec :

- W = largeur de la bande passante
- B = bande passante nécessaire par utilisateur
- N = facteur de réutilisation spectrale
= nombre de cellules par cluster
- m = nombre total de cellules
(quand m > n cela devient intéressant)

Notion de qualité de service, prise en compte de la complexité, taille des terminaux, etc.

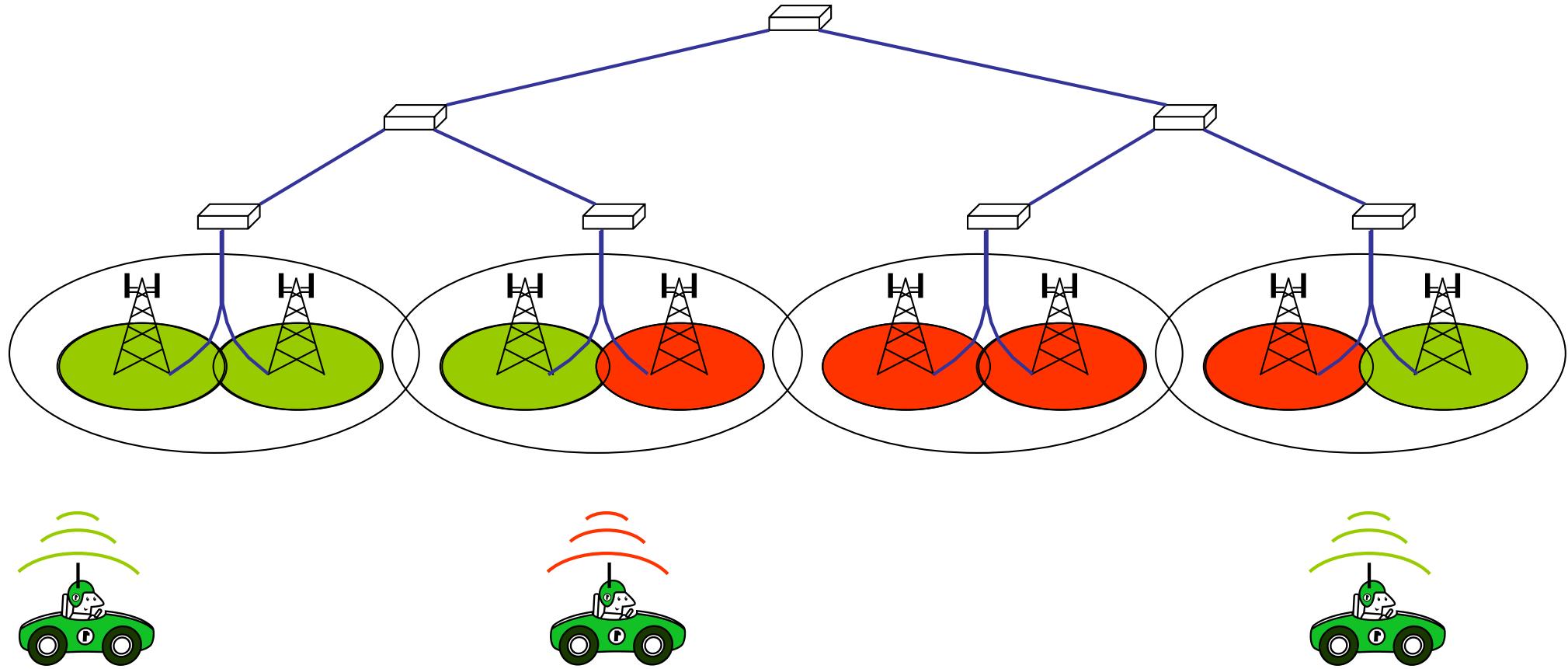
Organisation cellulaire

- **Plusieurs types de cellules :**
 - Femtocellules (qq mètres)
 - Picocellules (qq dizaines de mètres)
 - Microcellules (zone urbaine, antennes basses)
 - Macrocellules (zone urbaine, antennes hautes)
 - Megacellules Satellites (centaines de kms)
- Raisons : taille de la zone à couvrir, nombre d'utilisateurs, bâtiments, etc.

Mécanisme de "Handover"

- Procédé issu du téléphone cellulaire GSM
- Permet au mobile de continuer un transfert commencé dans une cellule, dans une autre
 - Intercellulaire : passage d'une cellule à une autre (AP<->AP)
 - Si le signal est trop faible (en général)
 - Si un point d'accès sature (partage de trafic)
 - Intracellulaire :
Changement de canal (si signal fort) avec qualité faible
 - Inter-réseau
Très important pour les systèmes 3G
- On parle de *Handoff* dans les systèmes US

Mécanisme de "Handover"



En veille

En communication
Mécanisme de Handover

En veille

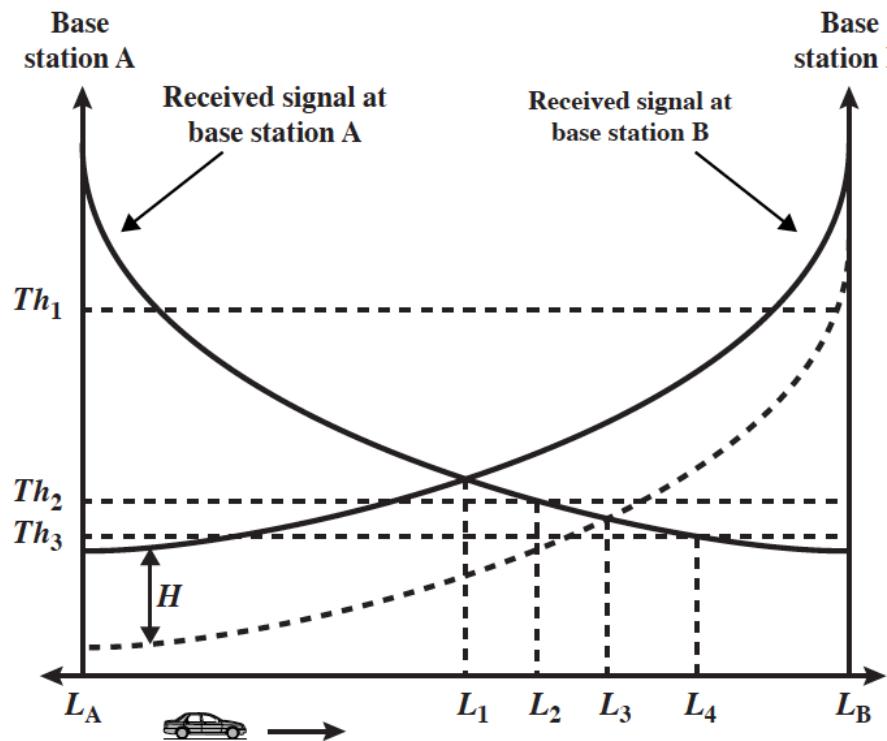
Mécanisme de "Handover"

2. Choix de la cellule cible

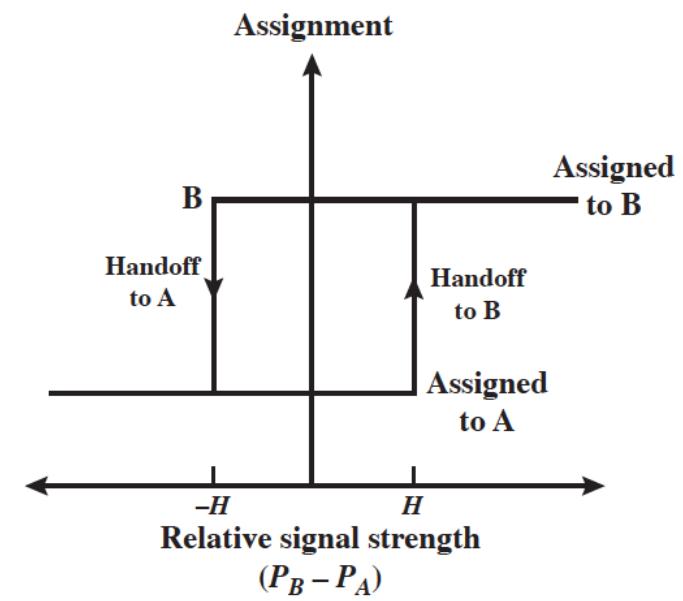
le mobile gère une liste de candidates (5 maxi en GSM) si il reçoit un signal suffisant pour le canal pilote

- puissance relative des signaux ($P_2 > P_1$)
- puissance relative des signaux avec seuil
($P_1 <$ seuil et $P_2 > P_1$)
- puissance relative des signaux avec hystérésis
($P_2 > P_1 +$ seuil)
- puissance relative des signaux avec seuil et hystérésis
($P_1 <$ seuil₁et $P_2 > P_1 +$ seuil₂)

Hysteresis-based selection



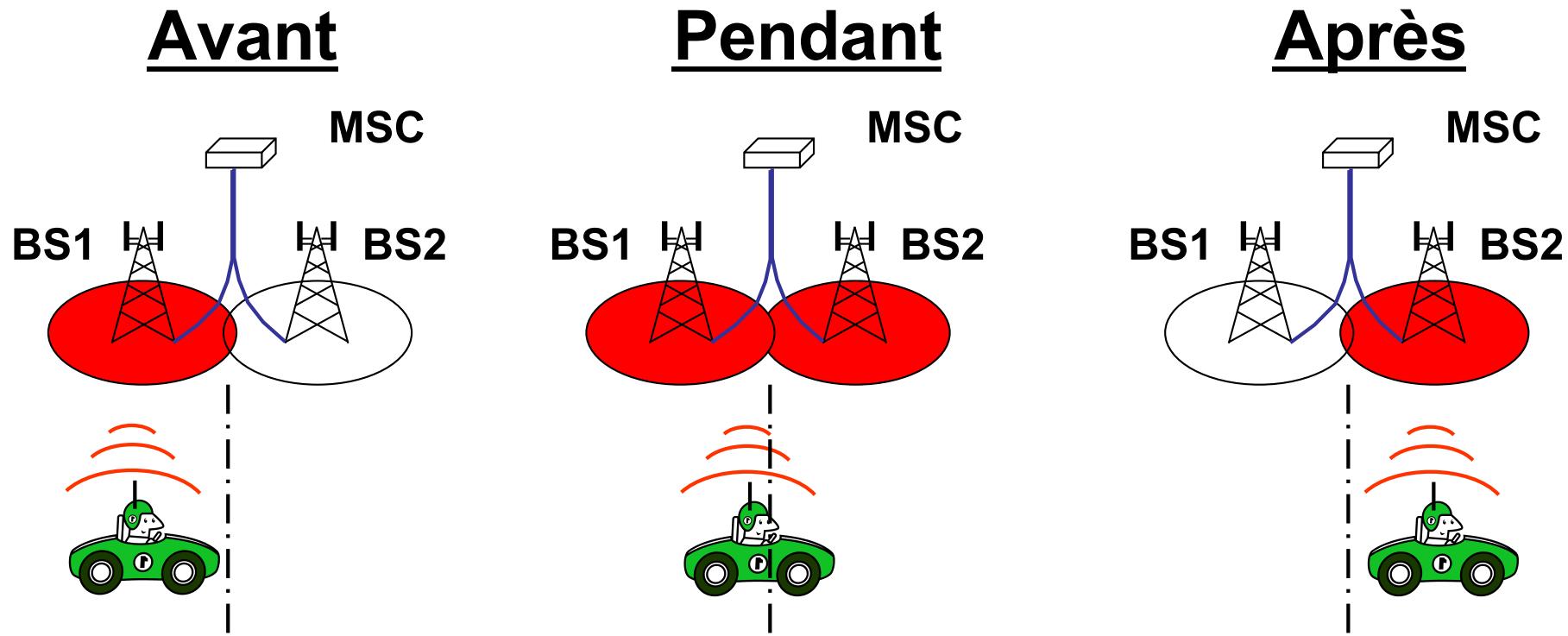
(a) Handoff decision as a function of handoff scheme



(b) Hysteresis mechanism

Mécanisme de "Handover"

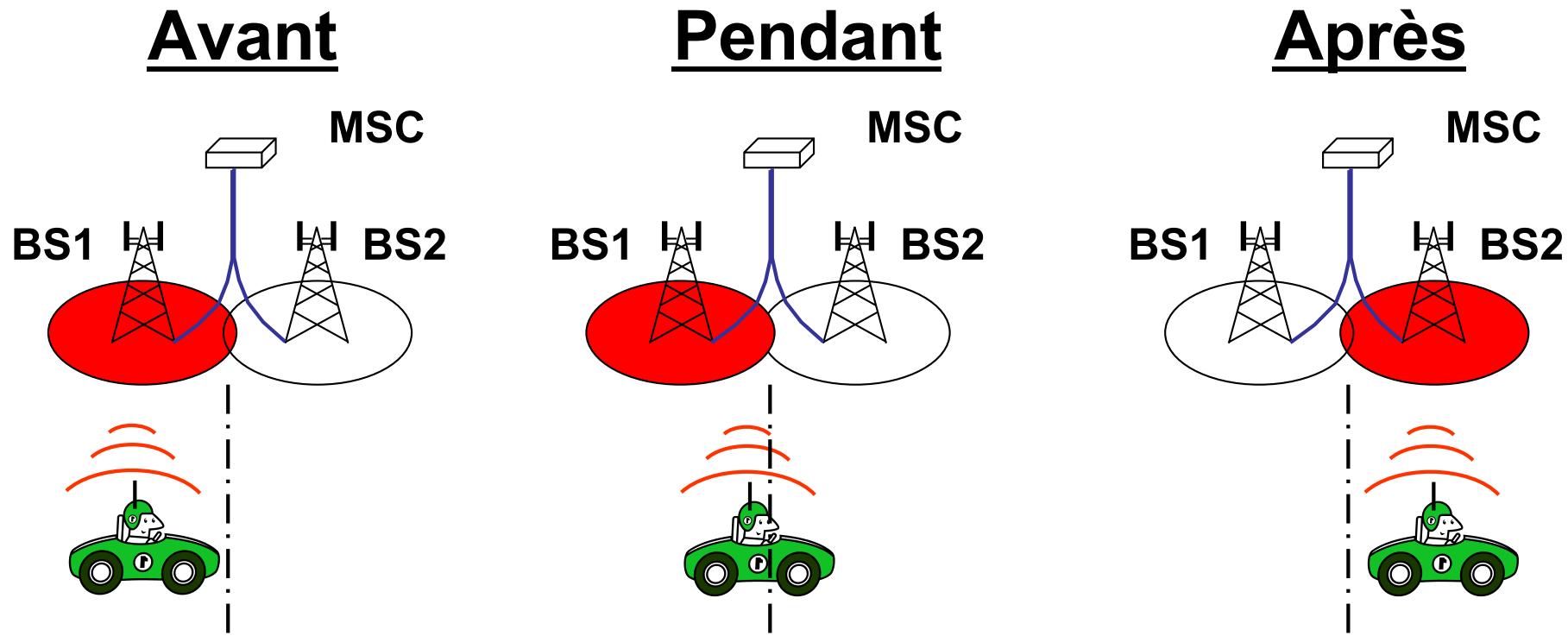
- Handover doux (soft-handover)



- Plus de consommation de ressources
- + Meilleur confort lors de passage d'une cellule à l'autre

Mécanisme de "Handover"

- Handover dur (hard-handover)



- Coupure de communication
la + réduite possible en établissant le lien à l'avance
- + Pas de sur-consommation des ressources

Wireless Network Evolution

RSF-2

Elément de transmission
physique

Couche physique

Eléments de transmission de données

- Chaque support de transmission permet un certain nombre de changement d'états par seconde (rapidité de modulation, Rm) exprimé en baud. 1 baud ne correspond pas forcément à 1 bit. Avec des schémas de codage complexe, 1 baud peut coder plusieurs bits.
- La bande passante limite la rapidité de modulation
- La valence est le nombre de niveau de valeur que peut prendre le signal:
 - (+5v, -5v): valence = 2
 - (+5v, +3v, -3v, -5v): valence =4
- Le débit binaire est directement relié à la rapidité de modulation:
 - quel est le débit binaire avec 2 niveaux de valeur?
 - quel est le débit binaire avec 4 niveaux de valeur?
- $D=Rm \cdot \log_2 V$

Débit maximum d'un canal de transmission

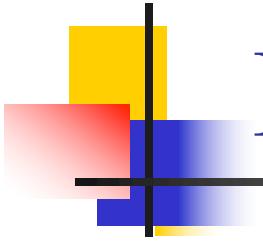
- Si un signal quelconque est appliqué à l'entrée d'un filtre passe-bas ayant une bande passante W , le signal ainsi filtré peut être reconstitué avec un échantillonnage à $2W$ Hz (Nyquist, Shannon)

$$D_{\max} = 2 W \log_2 V \text{ en bit/s}$$

si le signal comporte V niveaux significatifs (Valence).

- Le théorème de Shannon-Hartley donne le débit maximum sur une ligne bruité (S et N en watts, W en Hz, C en bits/s):

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$



Example of Nyquist and Shannon Formulations

- Spectrum of a channel between 3 MHz and 4 MHz ; $\text{SNR}_{\text{dB}} = 24 \text{ dB}$

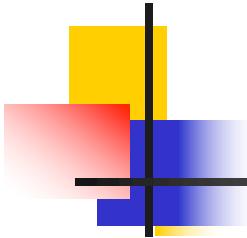
$$B = 4 \text{ MHz} - 3 \text{ MHz} = 1 \text{ MHz}$$

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 24 \text{ dB} = 10 \log_{10}(\text{SNR})$$

$$\text{SNR} = 251$$

- Using Shannon's formula

$$C = 10^6 \times \log_2(1 + 251) \approx 10^6 \times 8 = 8 \text{ Mbps}$$



Example of Nyquist and Shannon Formulations

- How many signaling levels are required?

$$C = 2B \log_2 M$$

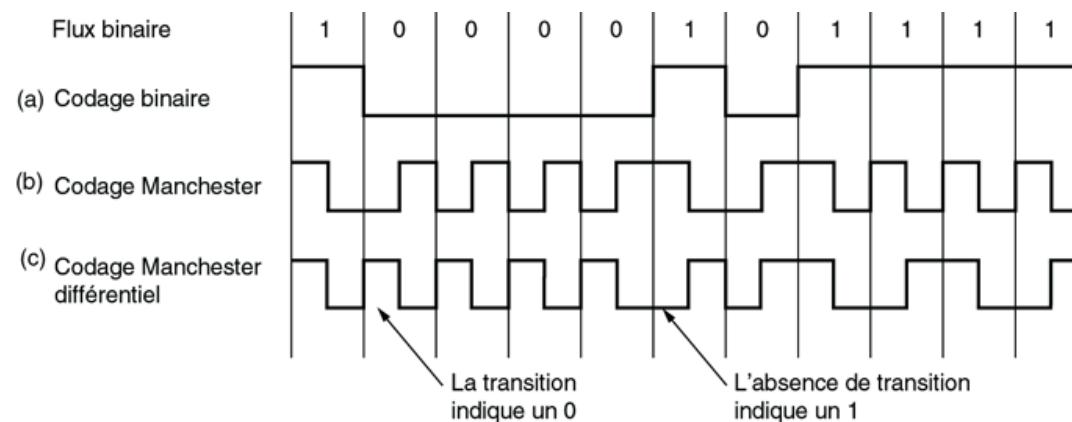
$$8 \times 10^6 = 2 \times (10^6) \times \log_2 M$$

$$4 = \log_2 M$$

$$M = 16$$

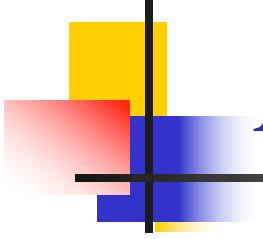
Transmission en bande de base

- En bande de base, les 0 et les 1 binaires sont directement représentés par des valeurs de tensions. L'avantage est la simplicité, mais les distances sont limitées à quelques kilomètres.
 - **NRZ**: les 1 sont codés par une tension positive, les 0 par l'opposé. Pas d'horloge véhiculée, problème de synchronisation.
 - **Manchester**: Transition au milieu de chaque bit. Les 0 sont codés par un front montant, les 1 par un front descendant. Synchronisation.
 - **Manchester Différentiel**: Les transitions ne codent que l'horloge. Les bits sont codés par la présence (0) ou l'absence de transition (1) en début. Pas de polarité.



Les difficultés en transmission sans-fil

- Codage bande de base pas possible
- La puissance de transmission doit nécessairement être plus limitée
- Plus grands taux d'erreurs
- Les technologies très haut débit en filaires ne sont pas ou très peu applicables car en filaire c'est essentiellement de la fibre optique
- Les méthodes de modulation sur fibre optique sont beaucoup plus simples car la bande passante disponible est énorme!
- Les transparents suivants expliquent et montrent l'état des technologies en réseaux sans fil pour atteindre un plus haut débit

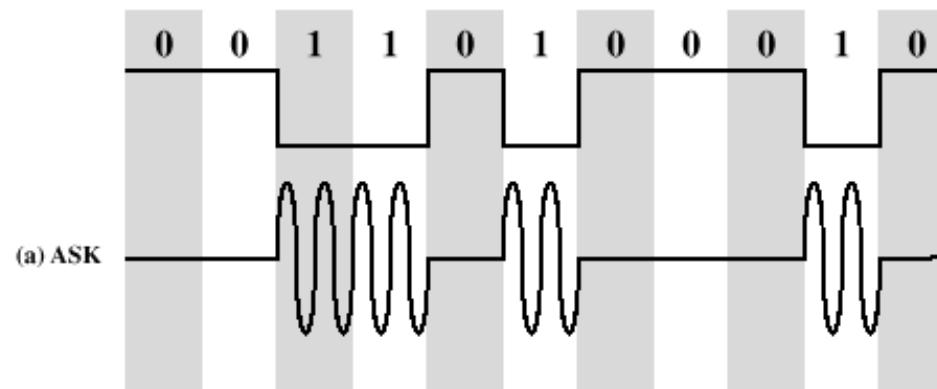


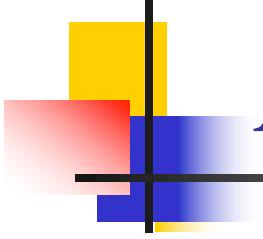
Amplitude-Shift Keying

- One binary digit represented by presence of carrier, at constant amplitude
- Other binary digit represented by absence of carrier

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ 0 & \text{binary 0} \end{cases}$$

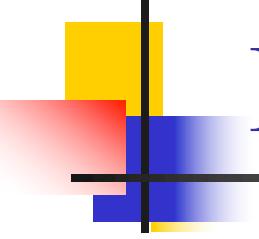
- where the carrier signal is $A \cos(2\pi f_c t)$





Amplitude-Shift Keying

- Susceptible to sudden gain changes
- Inefficient modulation technique
- On voice-grade lines, used up to 1200 bps
- Used to transmit digital data over optical fiber

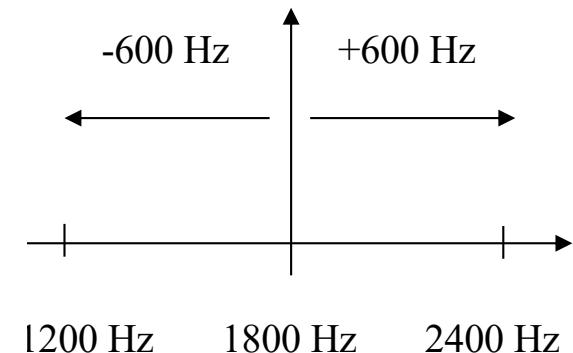
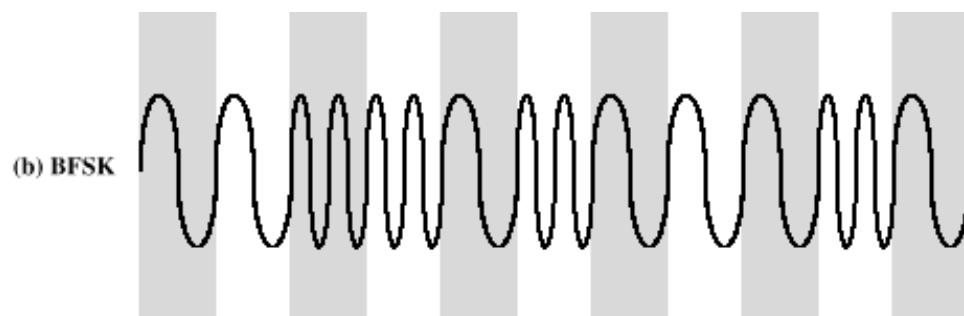


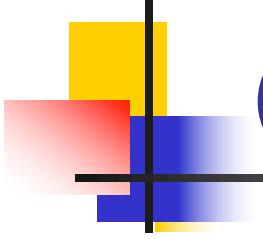
Frequency-Shift Keying: BFSK

- Two binary digits represented by two different frequencies near the carrier frequency

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{binary 1} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & \text{binary 0} \end{cases}$$

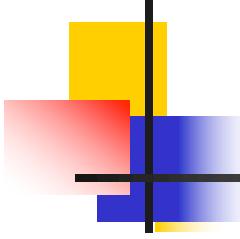
- where f_1 and f_2 are offset from carrier frequency f_c by equal but opposite amounts





Binary Frequency-Shift Keying (BFSK)

- Less susceptible to error than ASK
- On voice-grade lines, used up to 1200bps
- Used for high-frequency (3 to 30 MHz) radio transmission
- Can be used at higher frequencies on LANs that use coaxial cable



Multiple Frequency-Shift Keying (MFSK)

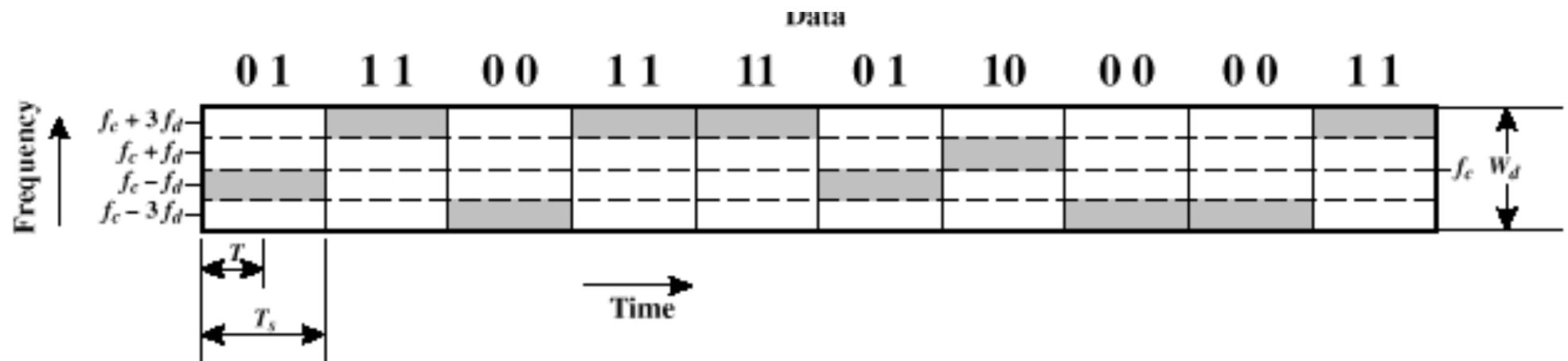
- More than two frequencies are used
- More bandwidth efficient but more susceptible to error

$$s_i(t) = A \cos 2\pi f_i t \quad 1 \leq i \leq M$$

- $f_i = f_c + (2i - 1 - M)f_d$
- f_c = the carrier frequency
- f_d = the difference frequency
- M = number of different signal elements = 2^L
- L = number of bits per signal element

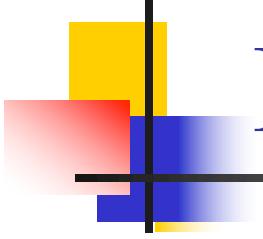
Multiple Frequency-Shift Keying (MFSK)

- Ex: $f_c=250\text{kHz}$, $f_d=25\text{kHz}$, $M=4$ ($L=2$ bits)



- $f_i = f_c + (2i - 1 - M)f_d$

Figure 6.4 MFSK Frequency Use ($M = 4$)

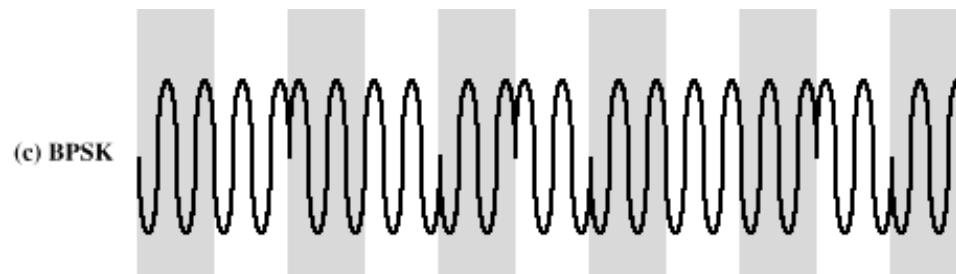


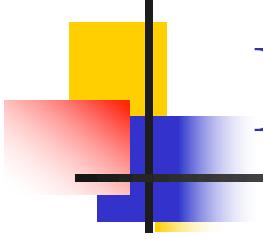
Phase-Shift Keying (PSK)

- Two-level PSK (BPSK)
 - Uses two phases to represent binary digits

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{binary 0} \end{cases}$$

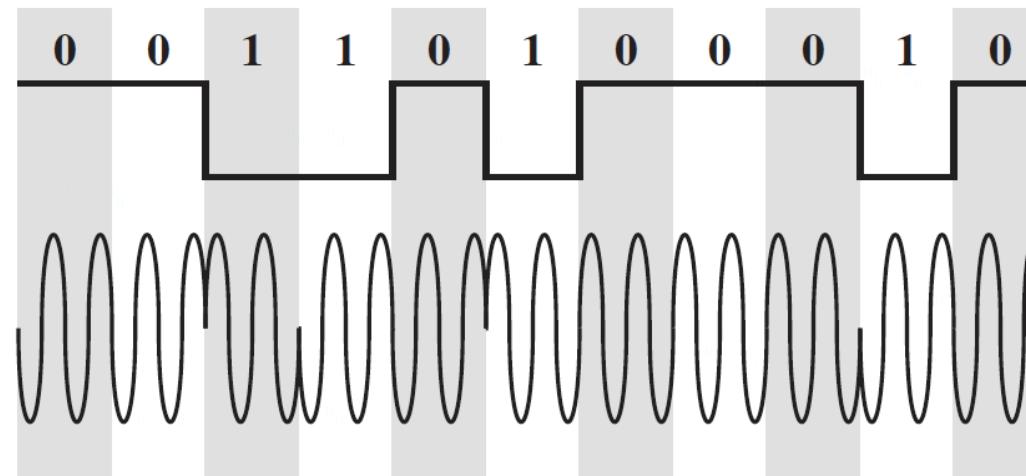
$$= \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ -A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 0} \end{cases}$$

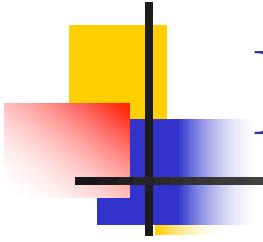




Phase-Shift Keying (PSK)

- Differential PSK (DPSK)
 - Phase shift with reference to previous bit
 - Binary 0 – signal burst of same phase as previous signal burst
 - Binary 1 – signal burst of opposite phase to previous signal burst





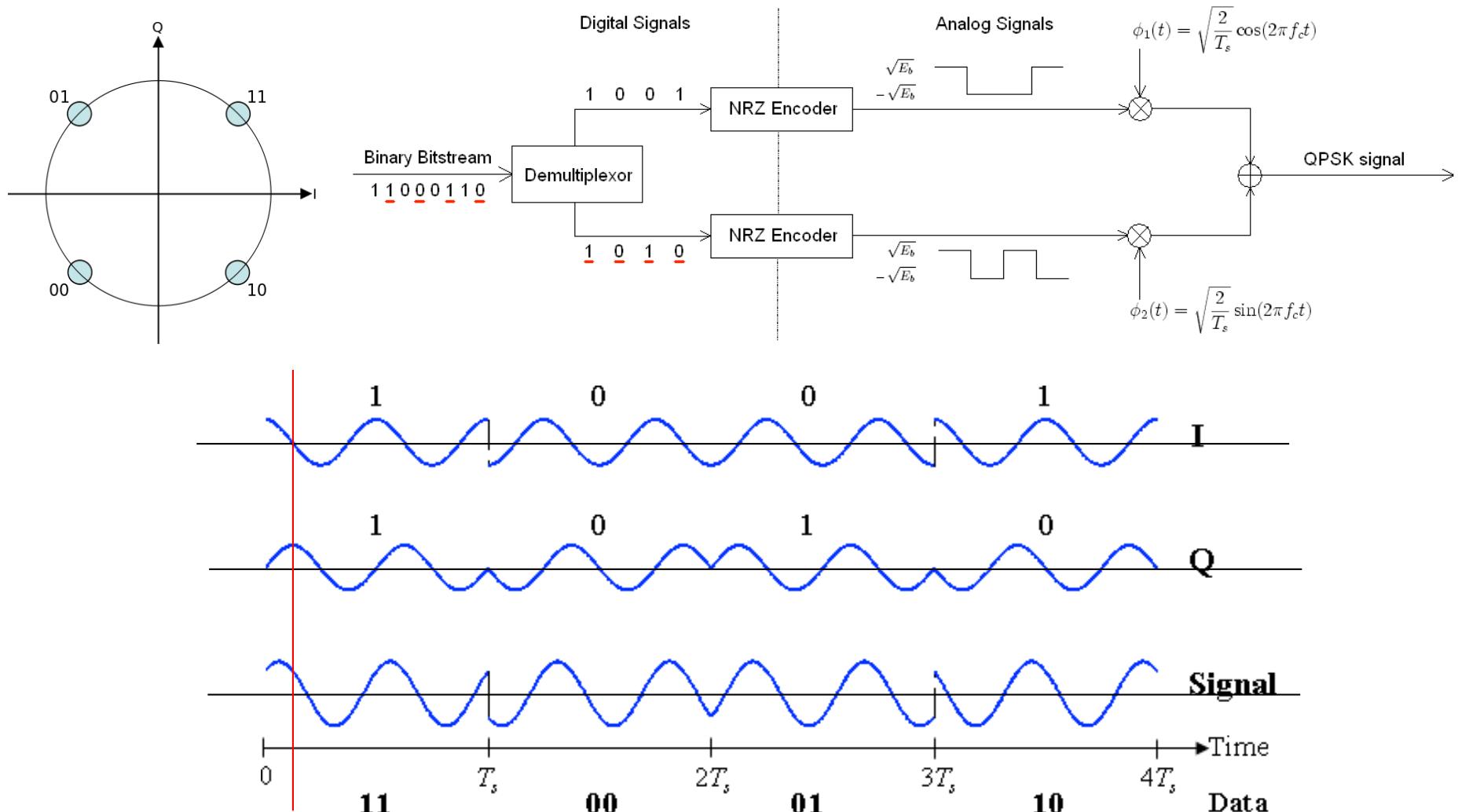
Phase-Shift Keying (PSK)

- Four-level PSK (QPSK or 4-PSK)
 - Each element represents more than one bit

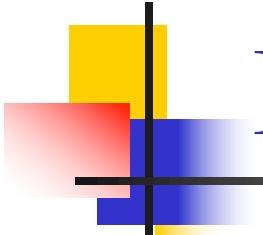
$$s(t) = \begin{cases} A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}\right) & 11 \\ A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}\right) & 01 \\ A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}\right) & 00 \\ A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}\right) & 10 \end{cases}$$



QPSK



Source wikipedia

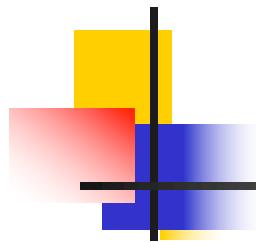


Phase-Shift Keying (PSK)

- Multilevel PSK (MPSK)
 - Using multiple phase angles with each angle having more than one amplitude, multiple signals elements can be achieved

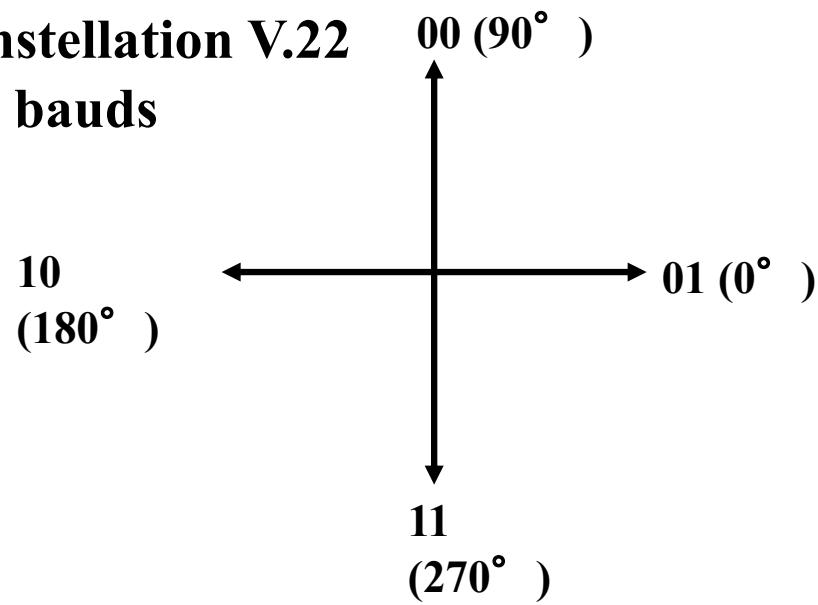
$$D = \frac{R}{L} = \frac{R}{\log_2 M}$$

- D = modulation rate, baud
- R = data rate, bps
- M = number of different signal elements = 2^L
- L = number of bits per signal element

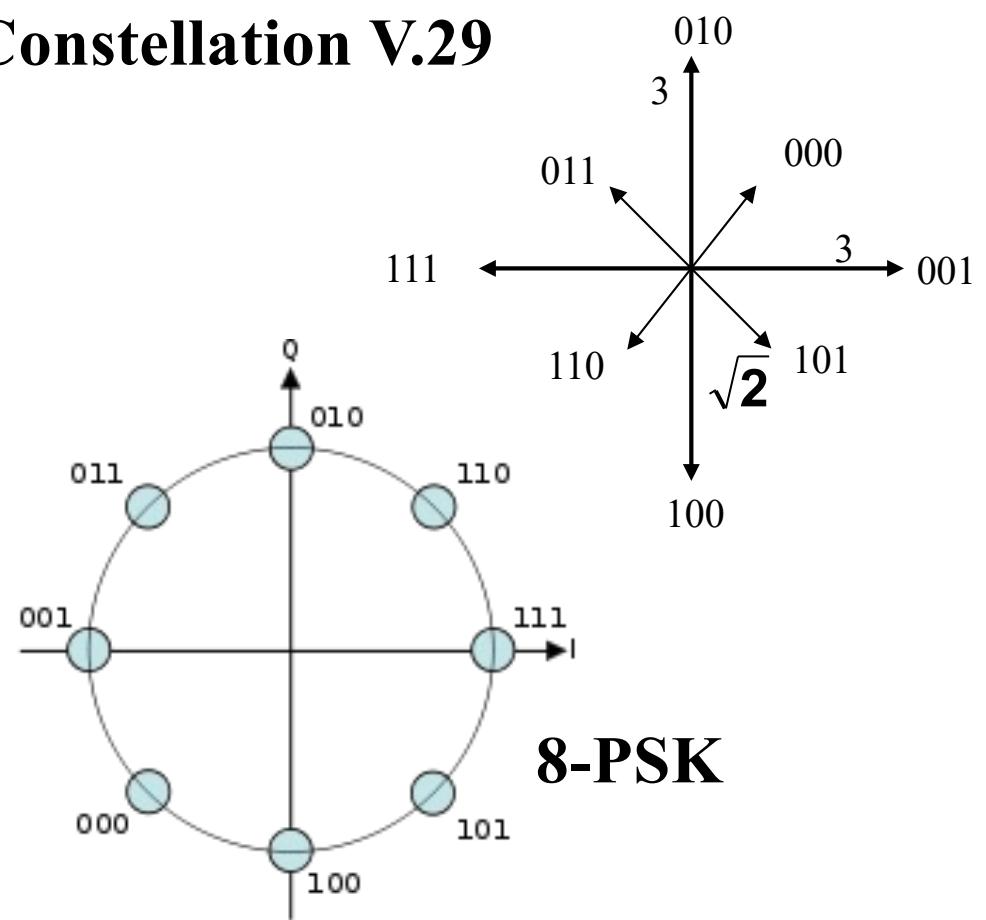


QPSK and MPSK

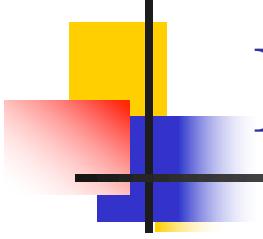
Constellation V.22
600 bauds



Constellation V.29



8-PSK



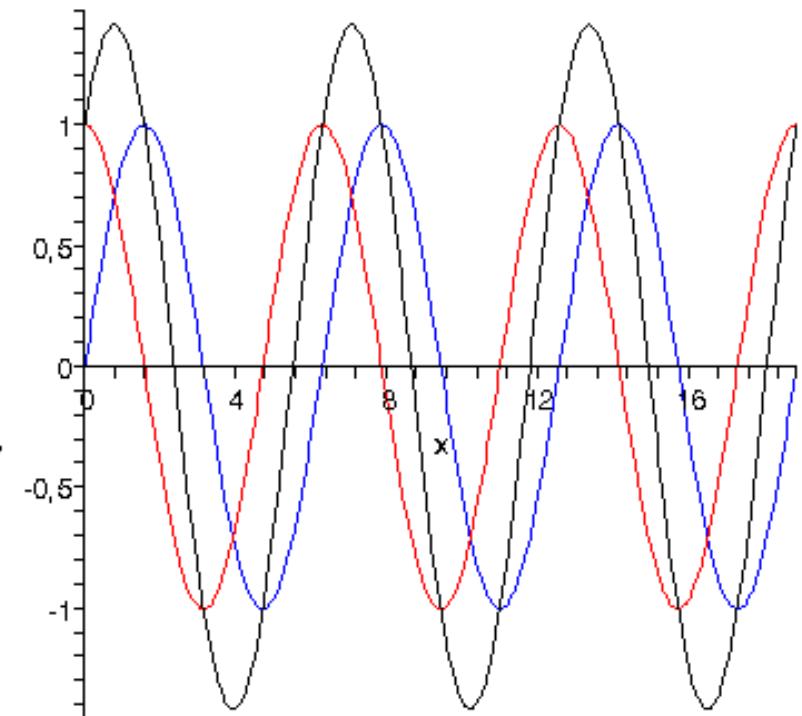
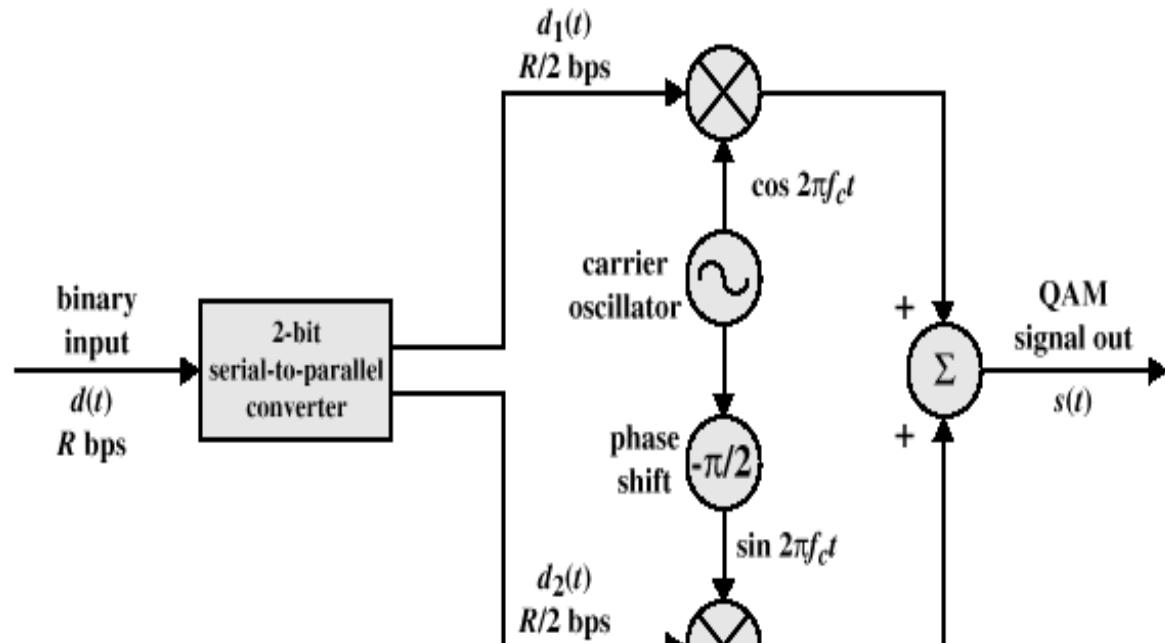
Quadrature Amplitude Modulation

- QAM is a combination of ASK and PSK
 - Two different signals sent simultaneously on the same carrier frequency

$$s(t) = d_1(t) \cos 2\pi f_c t + d_2(t) \sin 2\pi f_c t$$

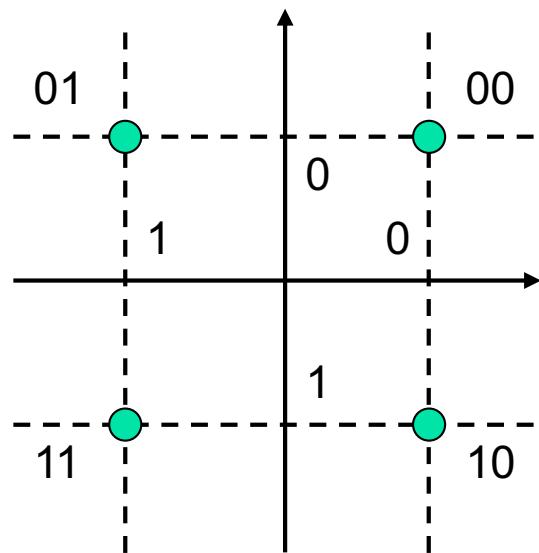
- Amplitude modulating two carriers in quadrature can be equivalently viewed as both amplitude modulating and phase modulating a single carrier.

QAM modulator

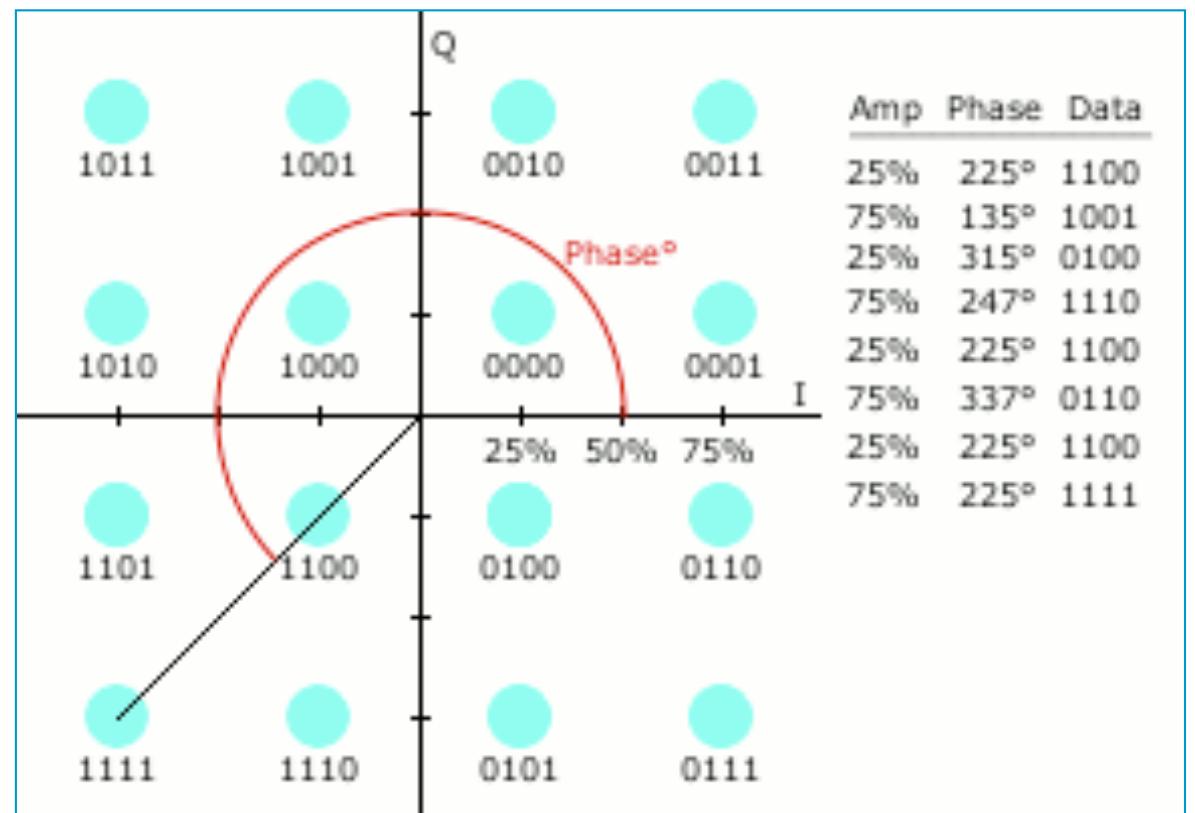


4-QAM, 16-QAM

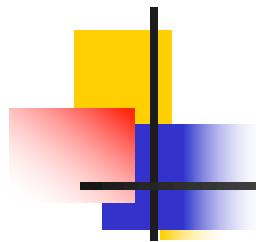
Modulation de phase
4 états (2 bits)



Quadrature Amplitude Modulation
QAM 16



Source wikipedia



64-QAM, 128-QAM

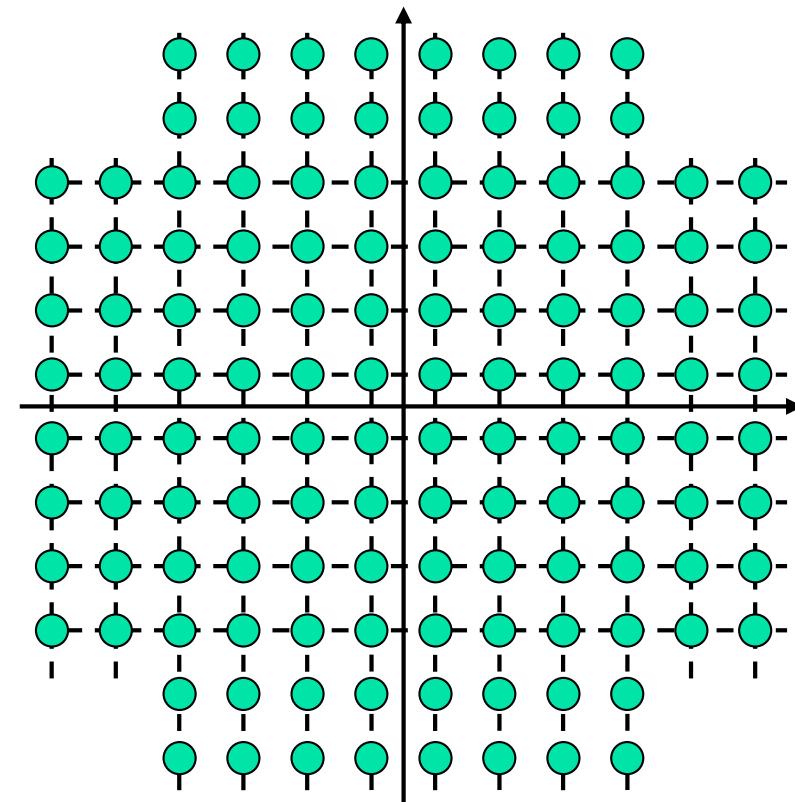
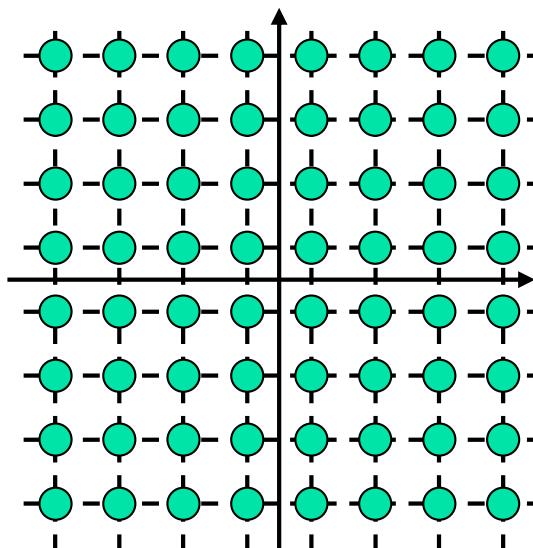
Quadrature Amplitude Modulation
QAM 128

128 états (7 bits)

Quadrature Amplitude Modulation

QAM 64

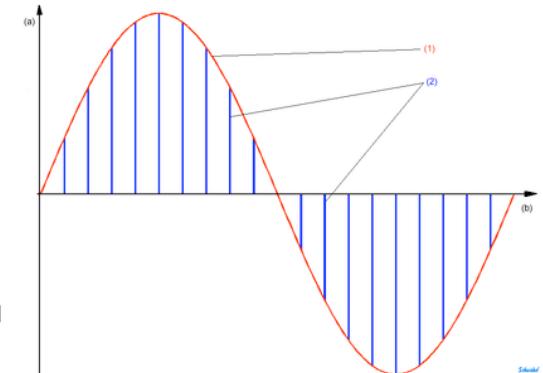
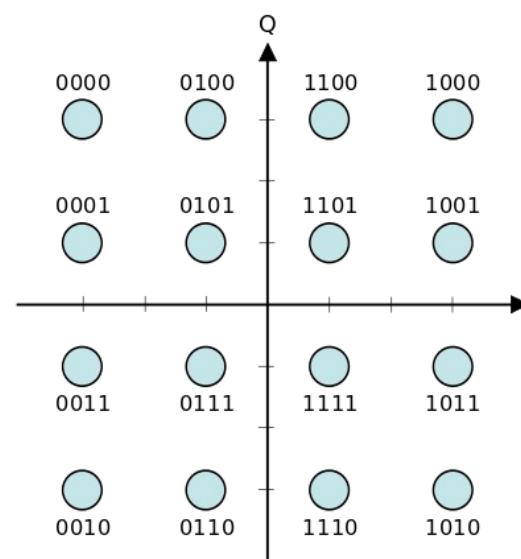
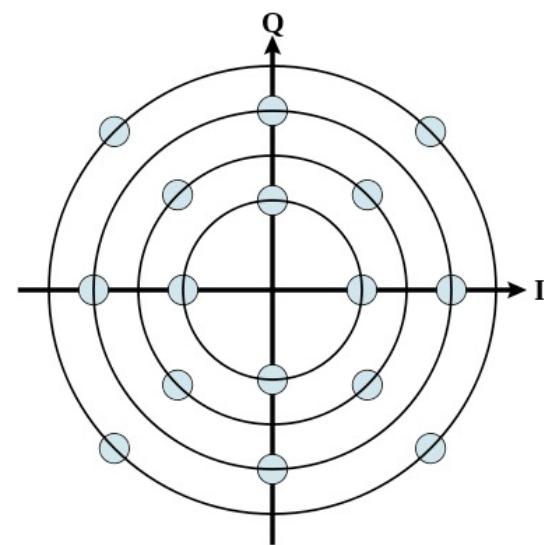
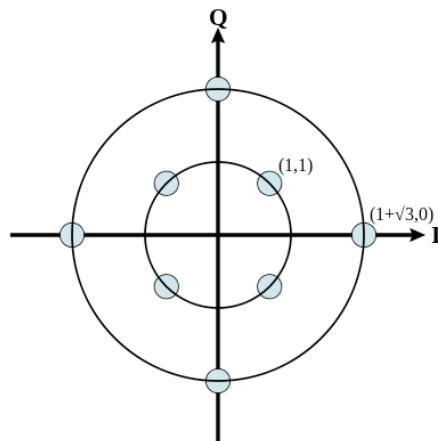
64 états (6 bits)



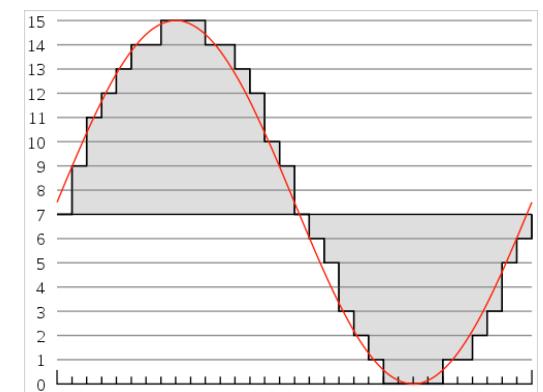
INFO

Non-rectangular QAM

- More efficient than rectangular QAM, but more difficult to module and demodulate
- Rectangular QAM can use 2 pulse-amplitude-modulation signal which are easier to implement

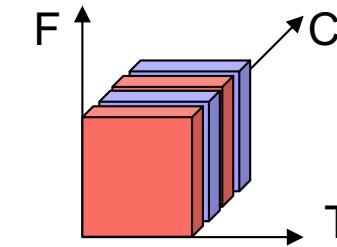
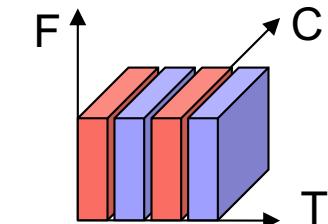
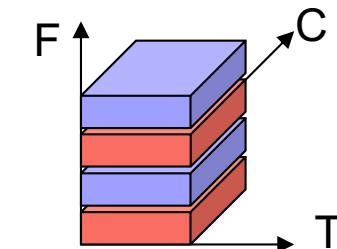


Source wikipedia



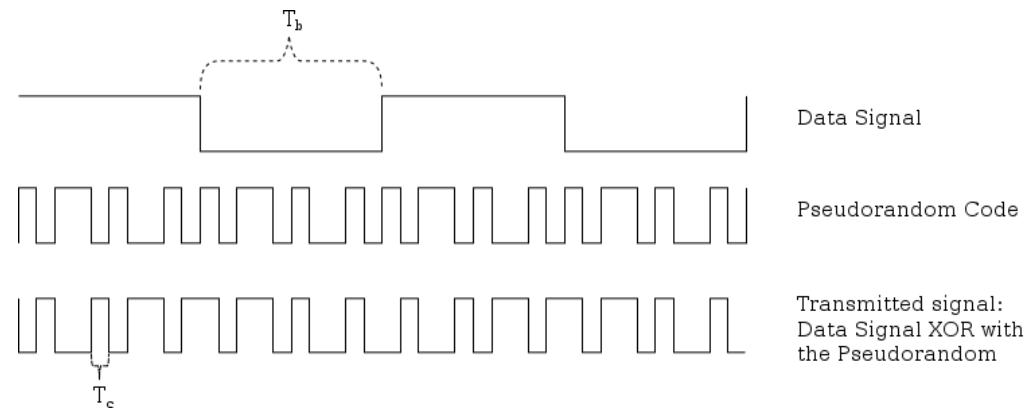
Multiplexage

- **Objectif** : optimiser l'usage des canaux de transmission pour un transit simultané du maximum d'informations \Rightarrow **partage (multiplexage)** du support physique de transmission entre plusieurs signaux.
- Ces techniques peuvent se classer en trois grandes catégories:
 - **multiplexage fréquentiel** :
MRF (Multiplexage par Répartition de Fréquence)
FDM (Frequency Division Multiplexing)
 - **multiplexage temporel** :
MRT (Multiplexage à Répartition dans le Temps)
TDM (Time Division Multiplexing)
 - **multiplexage par code**
CDM (Code Division Multiplexing)



CDMA (Code Division Multiple Access)

- Un code pour chaque utilisateur lui permet de filtrer et décoder les communications qui lui sont adressées

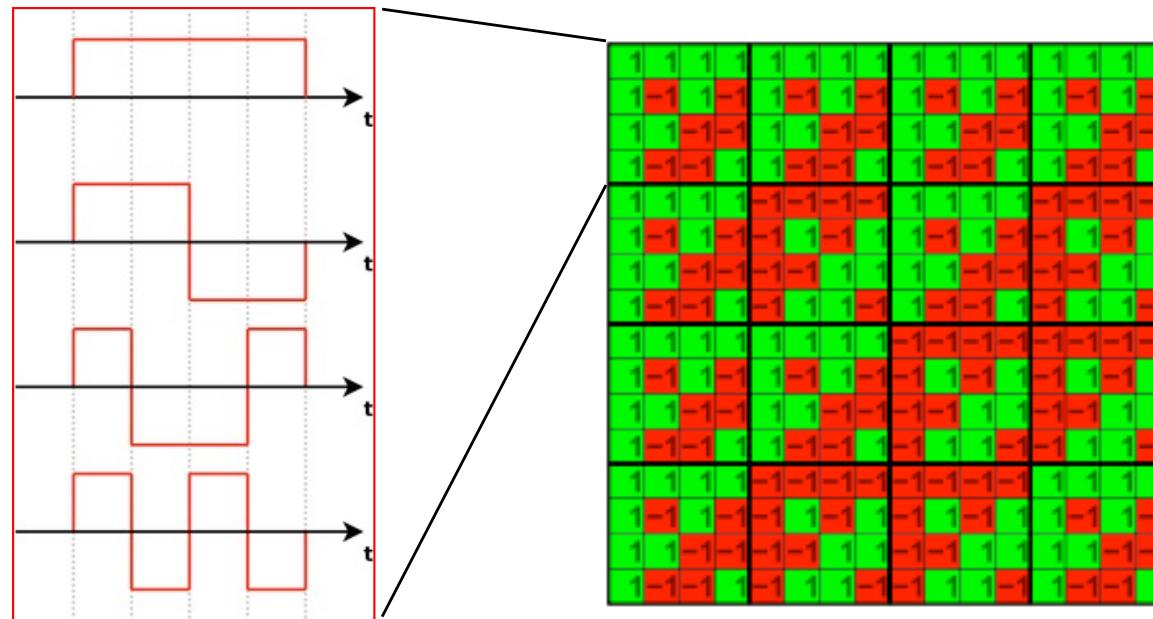


- Exploite les propriétés mathématiques entre les codes orthogonaux. 2 codes sont orthogonaux si le produit scalaire de leur vecteur associés est nul. $u = (a, b)$ and $v = (c, d)$ alors $u.v = a.c+b.d$
- Ex: $u=(1,1)$, $v=(1,-1)$

CDMA, suite

- Matrice de Walsh, de dimension en puissance de 2.

- $W_1 = (1)$, $W_{2n} = \begin{Bmatrix} W_n & W_n \\ W_n & W_n \end{Bmatrix}$ $W_2 = \begin{Bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{Bmatrix}$



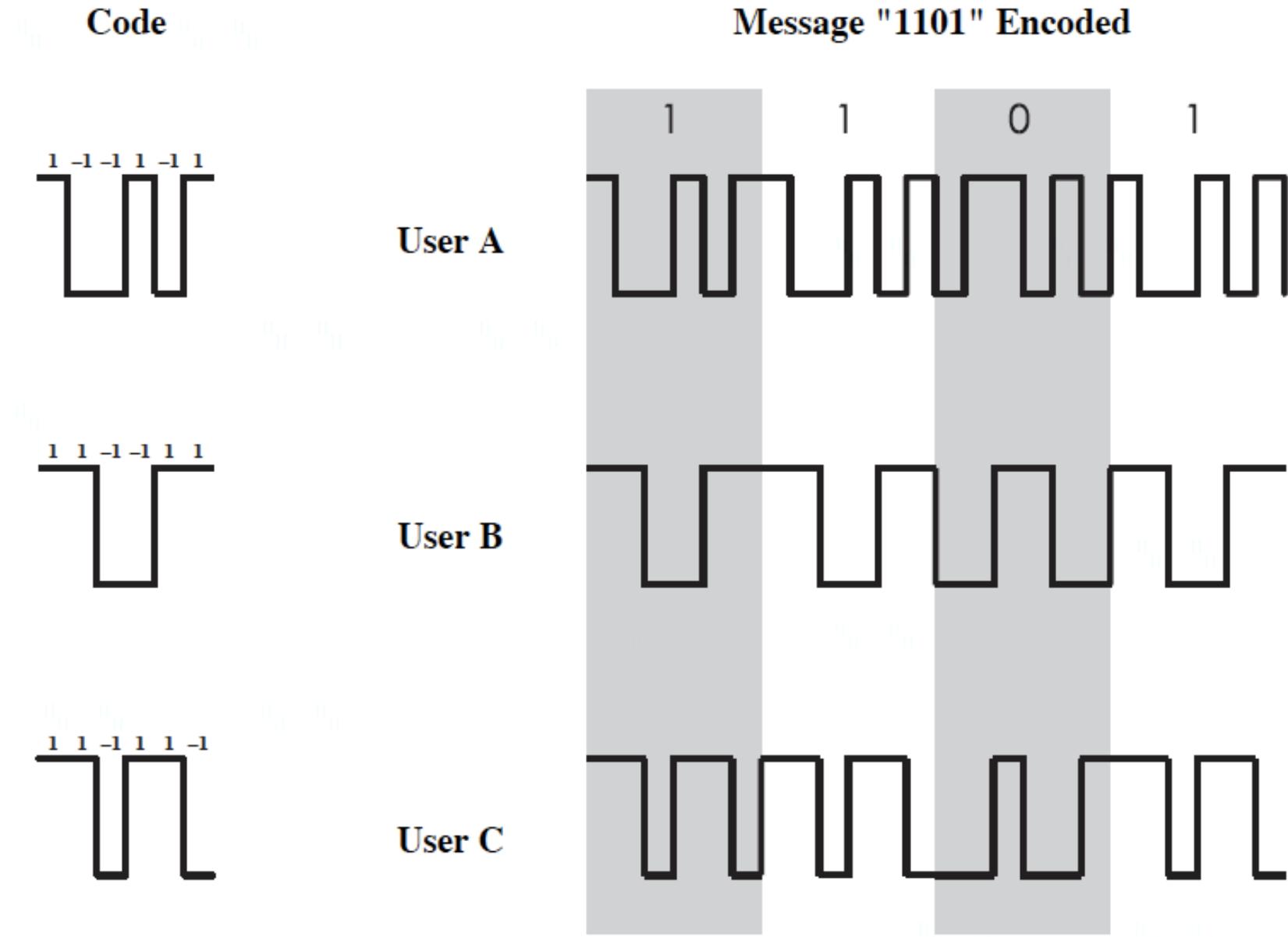
- Le produit scalaire entre 2 lignes ou 2 colonnes est nul. Les codes associés sont orthogonaux.

Auteur: C. Pham, Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)

CDMA, exemple de codage

- Each user is associated with a different code, say v . A 1 bit is represented by transmitting a positive code, v , and a 0 bit is represented by a negative code, $-v$. For example, if $v = (1, -1)$ and the data that the user wishes to transmit is $(1, 0, 1, 1)$, then the transmitted symbols would be $(v, -v, v, v) = (v_0, v_1, -v_0, -v_1, v_0, v_1, v_0, v_1) = (1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1)$.
- Exemple
 - Code0= (1,-1) et Code1= (1,1)
 - Data0= (1,0,1,1) et Data1=(0,0,1,1)
 - Signal0= (1,-1,-1,1,1,-1,1,-1) et Signal1= (-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1)

Exemple de transmission CDMA



CDMA, transmission et décodage

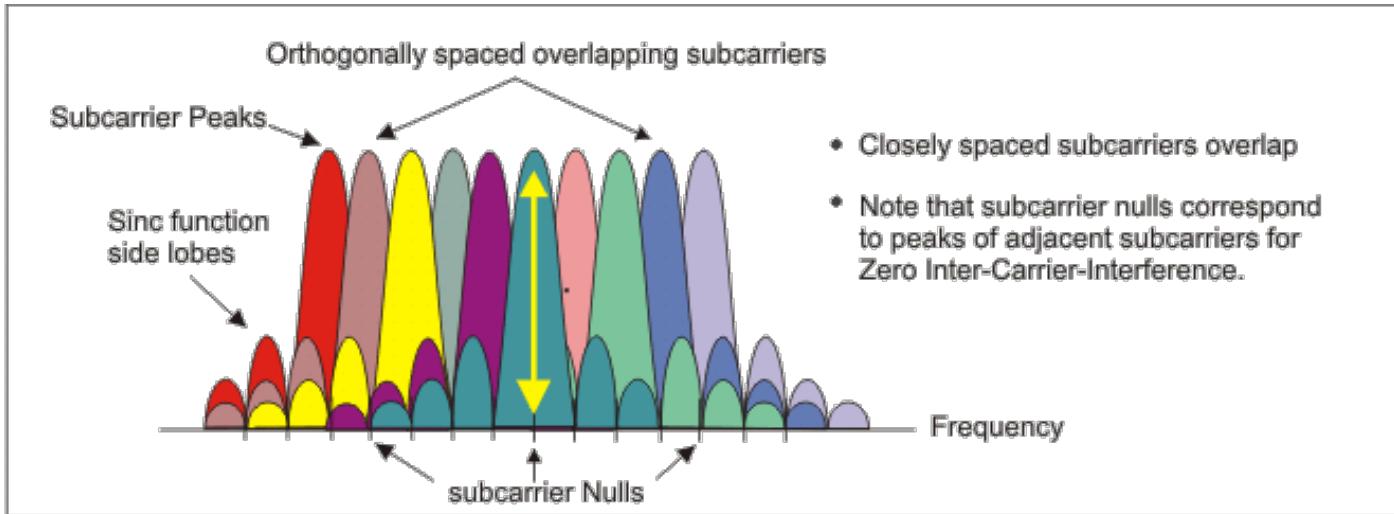
- Now, due to physical properties of interference, if two signals at a point are in phase, they add to give twice the amplitude of each signal, but if they are out of phase, they subtract and give a signal that is the difference of the amplitudes. Digitally, this behaviour can be modelled by the addition of the transmission vectors, component by component.
- $(1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1) + (-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1) = (0, -2, -2, 0, 2, 0, 2, 0)$

Step	Decode sender0	Decode sender1
0	$\text{code0} = (1, -1)$, $\text{signal} = (0, -2, -2, 0, 2, 0, 2, 0)$	$\text{code1} = (1, 1)$, $\text{signal} = (0, -2, -2, 0, 2, 0, 2, 0)$
1	$\text{decode0} = \text{pattern.vector0}$	$\text{decode1} = \text{pattern.vector1}$
2	$\text{decode0} = ((0, -2), (-2, 0), (2, 0), (2, 0)).(1, -1)$	$\text{decode1} = ((0, -2), (-2, 0), (2, 0), (2, 0)).(1, 1)$
3	$\text{decode0} = ((0 + 2), (-2 + 0), (2 + 0), (2 + 0))$	$\text{decode1} = ((0 - 2), (-2 + 0), (2 + 0), (2 + 0))$
4	$\text{data0} = (2, -2, 2, 2)$, meaning $(1, 0, 1, 1)$	$\text{data1} = (-2, -2, 2, 2)$, meaning $(0, 0, 1, 1)$

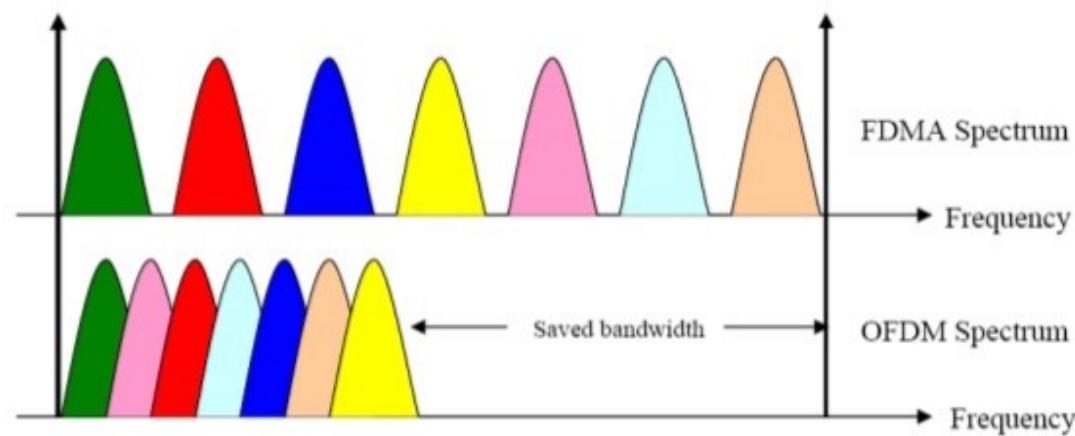
OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)

- **Principe : diviser le canal principal en sous canaux de fréquence plus faible. Chacun de ces sous canaux est modulé par une fréquence différente, l'espacement entre chaque fréquence restant constant. Ces fréquences constituent une base orthogonale : le spectre du signal OFDM présente une occupation optimale de la bande allouée.**
- **Multiplexage en fréquences, mais pour une seule source de données.**

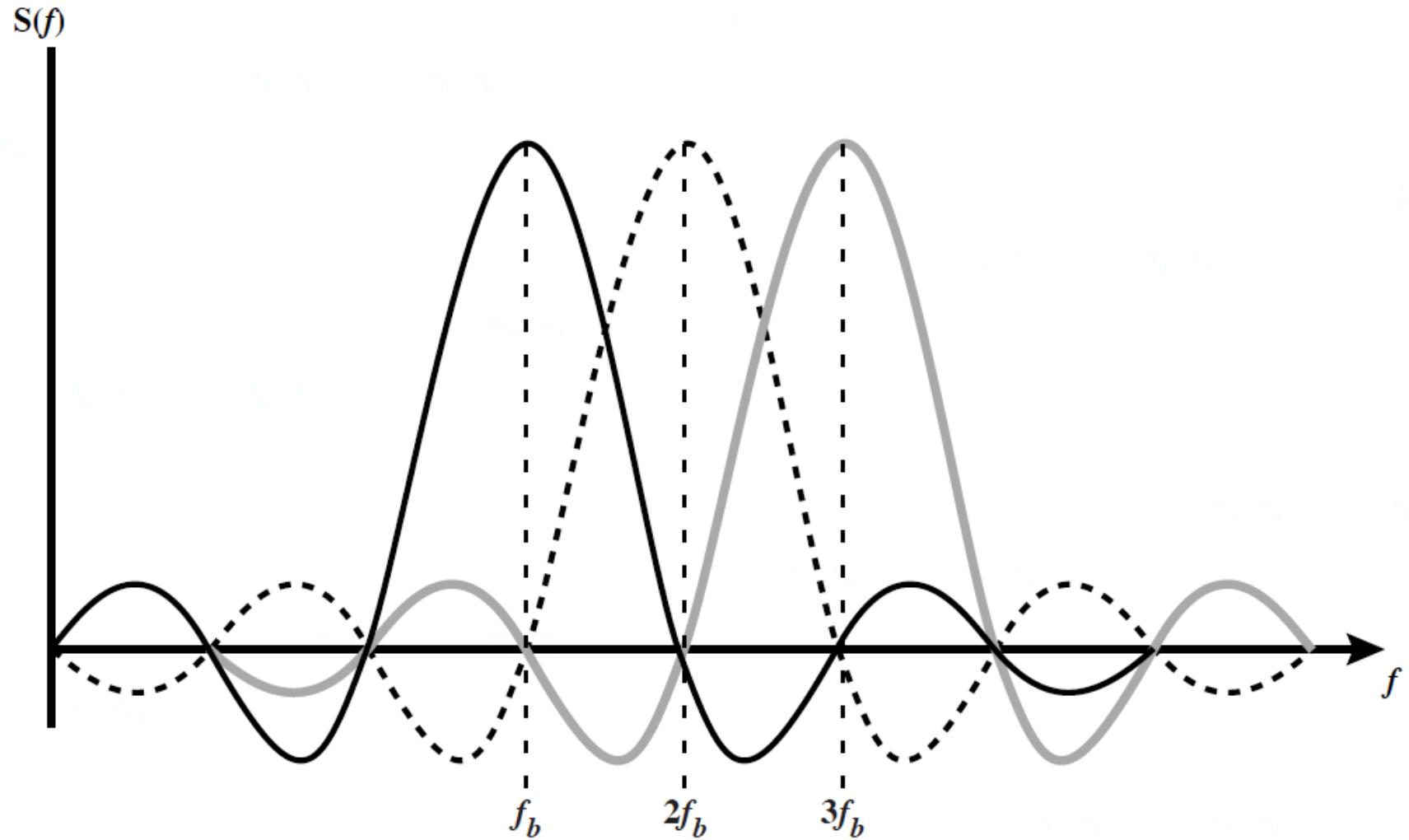
OFDM



OFDM Signal Frequency Spectra



OFDM

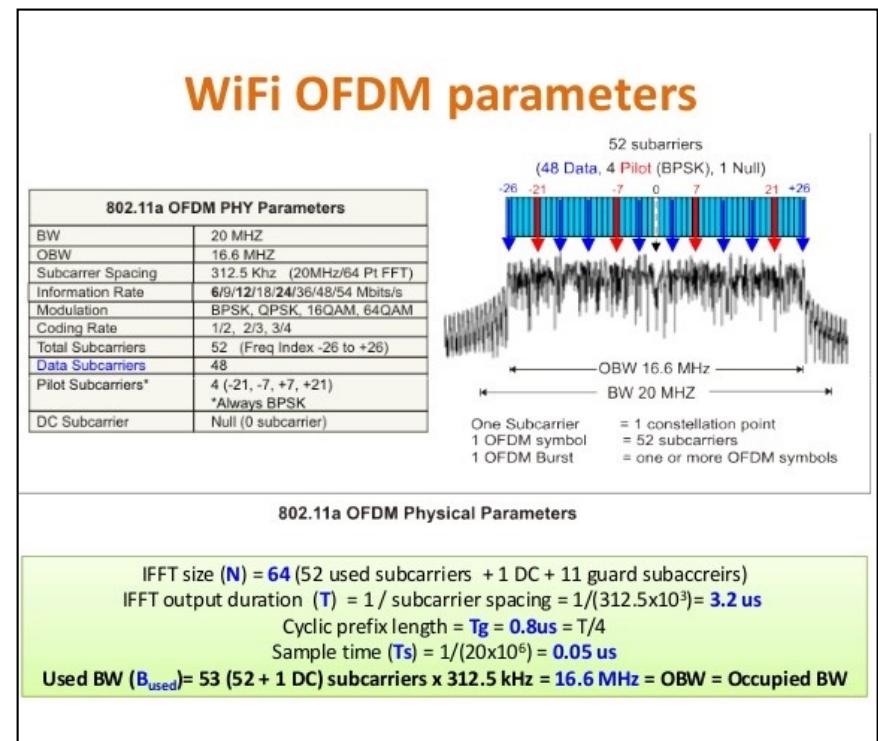


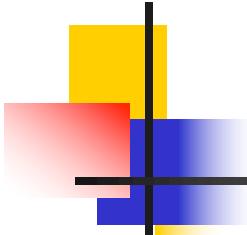
(b) Three subcarriers in frequency domain

OFDM et WiFi

Réseaux locaux 802.11 : standards physiques [masquer]							
Protocole 802.11	date ¹	Fréquence	largeur de bande	Débit binaire ²	Nombre maximum de flux MIMO	Codage / Modulation	Portée
		(GHz)	(MHz), (GHz)	(Mbit/s), (Gbit/s)			Intérieur (mètres) Extérieur (mètres)
802.11-1997 (d'origine)	juin 1997	2,4	79 ou 22 ³ MHz	1, 2 Mbit/s	NC	FHSS, DSSS	20 m 100 m
802.11a	sept 1999	5	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s	1	OFDM	35 m 120 m
		3,7[A]					— 5 000 m[A]
802.11b	sept 1999	2,4	22 MHz	1, 2, 5, 5, 11 Mbit/s	1	DSSS	35 m 140 m
802.11g	juin 2003	2,4	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s	1	OFDM	38 m 140 m
802.11n	oct 2009	2,4 / 5	20 MHz	7,2 à 72,2 Mbit/s[B] (6,5 à 65)[C]	4	OFDM	70 m (2,4 GHz) 12-35 m (5 GHz)
			40 MHz	15 à 150 Mbit/s[B] (13,5 à 135)[C]			250 m ⁴
802.11ac	déc 2013	5	20 MHz	6,5 à 346,8 Mbit/s[D]	8	OFDM	12-35 m 300 m
			40 MHz	13,5 à 800 Mbit/s[D]			
			80 MHz	19,3 Mbit/s à 1,7 Gbit/s[D]			
			160 MHz	58,5 Mbit/s à 3,4 Gbit/s[D]			
802.11ad	déc 2012	57 à 71	1,7 à 2,16 GHz	jusqu'à 6,75 Gbit/s ⁵	NC	OFDM ou porteuse unique	10 m ⁶
802.11af	février 2014	0,054 à 0,79	6 à 8 MHz	1,8 à 568,9 Mbit/s	1, 2, 4	OFDM	100 m 1000 m
802.11ah	mai 2017 ¹	0,9	1 à 8 MHz	0,6 à 8,6 Mbit/s ⁷	4	OFDM	100 m
802.11ax	novembre 2020	2,4 / 5	20 MHz	8 Mbit/s à 1,1 Gbit/s[D]	8	OFDM, OFDMA	12-35 m 300 m
			40 MHz	16 Mbit/s à 2,3 Gbit/s[D]			
			80 MHz	34 Mbit/s à 4,8 Gbit/s[D]			
			160 MHz	68 Mbit/s à 10,5 Gbit/s[D]			
802.11ay	décembre 2020 ⁸	58,3 à 70,2	2,16 à 8,64 GHz	20 à 176 Gbit/s	4 ⁹	OFDM ou single carrier	100 m 500

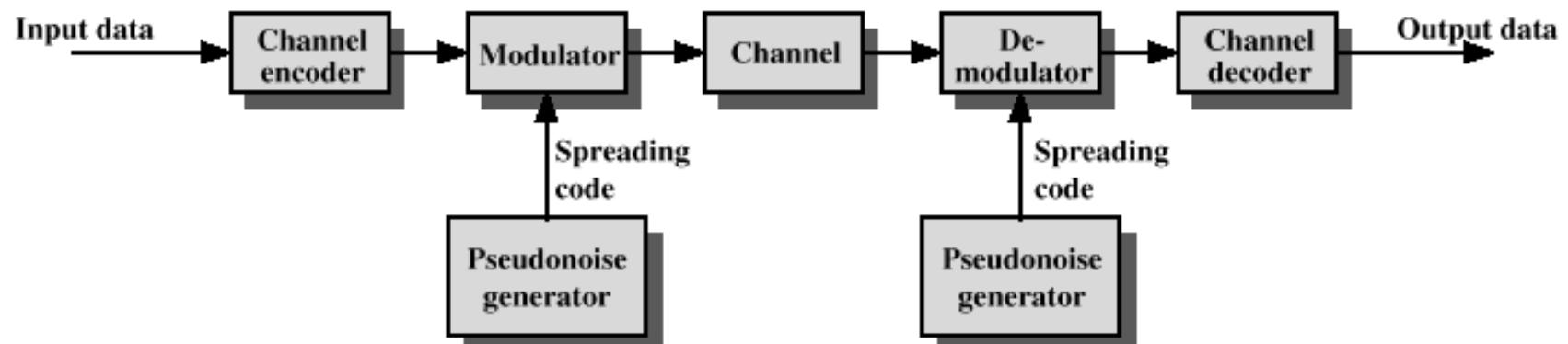
Voir aussi : [Wi-Fi](#) · [Liste des canaux WiFi](#)

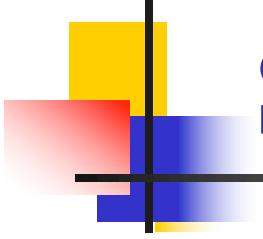




Spread Spectrum

- A signal generated with a particular bandwidth is deliberately spread in the frequency domain, resulting in a signal with a wider bandwidth.
- Secure communications, increasing resistance to natural interference, noise and jamming, to prevent detection, ...

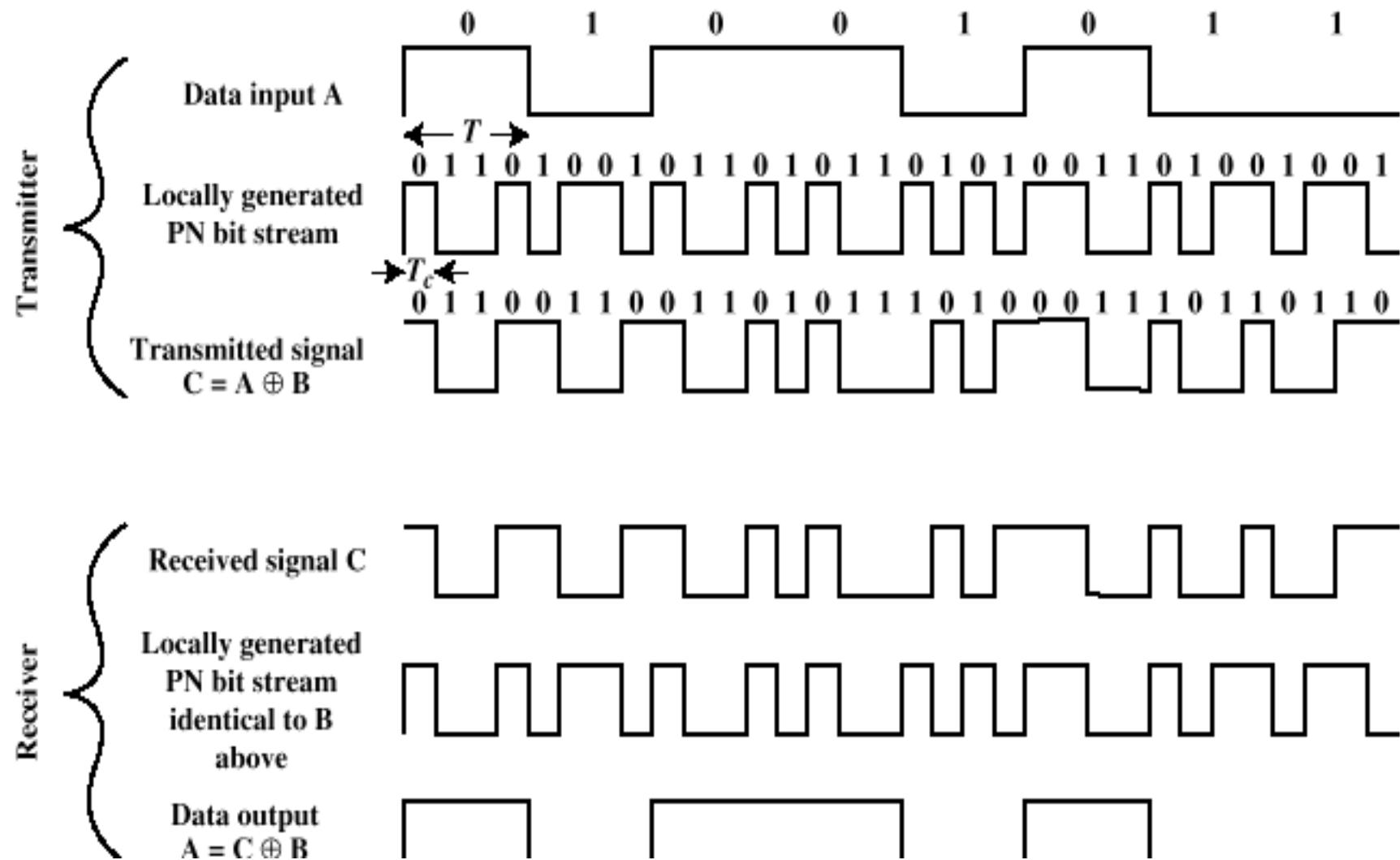


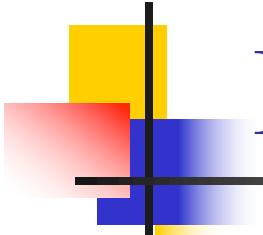


Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

- Each bit in original signal is represented by multiple bits in the transmitted signal
- Spreading code spreads signal across a wider frequency band
 - Spread is in direct proportion to number of bits used
- One technique combines digital information stream with the spreading code bit stream using exclusive-OR (Figure 7.6)

Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)





DSSS Using BPSK (1)

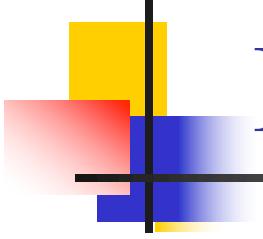
- Multiply BPSK signal,

$$s_d(t) = A d(t) \cos(2\pi f_c t)$$

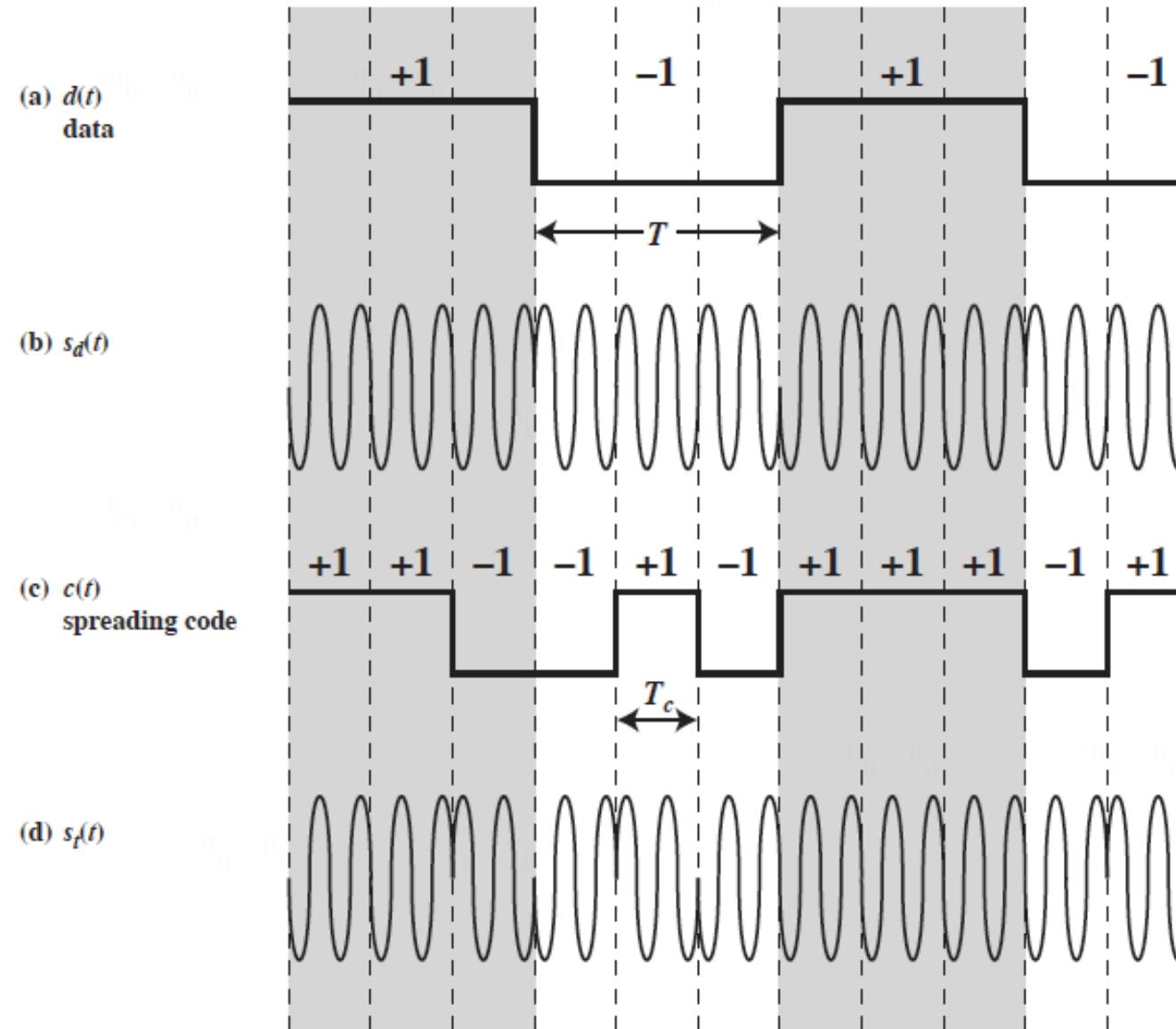
by $c(t)$ [takes values +1, -1] to get

$$s(t) = A d(t)c(t) \cos(2\pi f_c t)$$

- A = amplitude of signal
- f_c = carrier frequency
- $d(t)$ = discrete function [+1, -1]
- At receiver, incoming signal multiplied by $c(t)$
 - Since, $c(t) \times c(t) = 1$, incoming signal is recovered

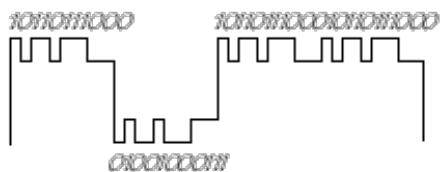
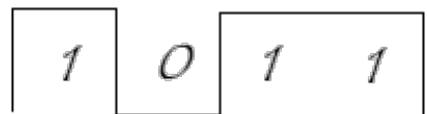


DSSS Using BPSK (2)

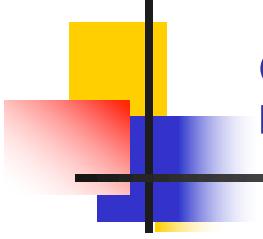


Direct Sequence Spread Spectrum in 802.11

- La couche physique de la norme 802.11 définit une séquence de 11 bits (**10110111000**) pour représenter un 1 et son complément (**01001000111**) pour coder un 0. On appelle *chip* ou *chipping code* (en français *puce*) chaque bit encodé à l'aide de la séquence. Cette technique (appelée *chipping*) revient donc à moduler chaque bit avec la séquence *barker*.

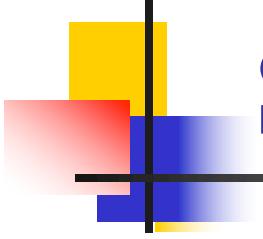


- Redondance=contrôle d'erreurs et possibilité de correction



Frequency Hoping Spread Spectrum (FHSS)

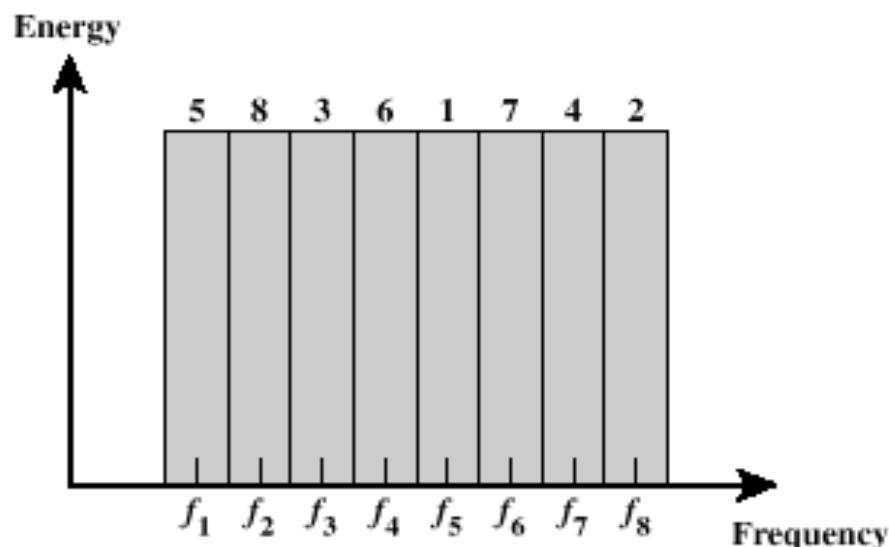
- Signal is broadcast over seemingly random series of radio frequencies
 - A number of channels allocated for the FH signal
 - Width of each channel corresponds to bandwidth of input signal
- Signal hops from frequency to frequency at fixed intervals
 - Transmitter operates in one channel at a time
 - Bits are transmitted using some encoding scheme
 - At each successive interval, a new carrier frequency is selected



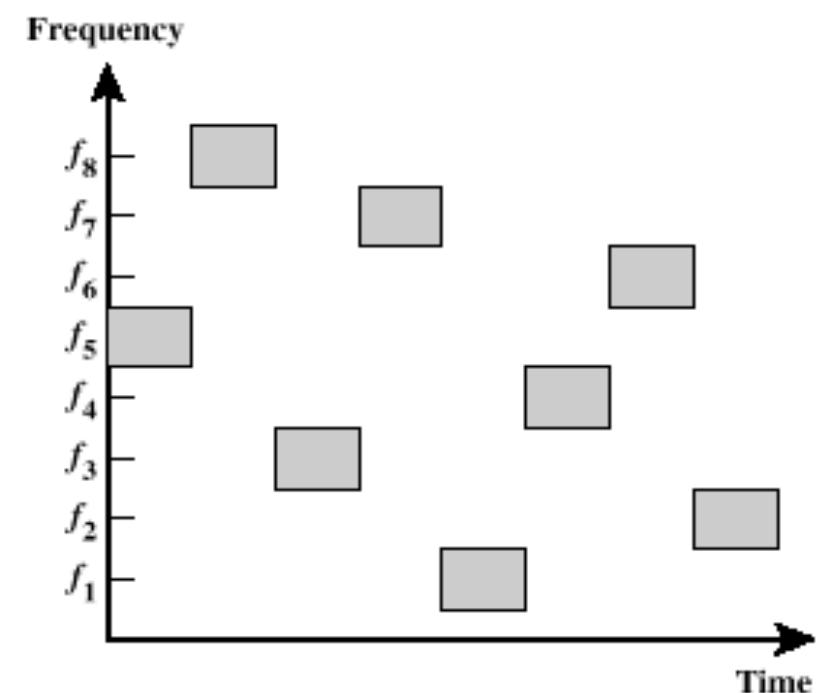
Frequency Hoping Spread Spectrum

- Channel sequence dictated by spreading code
- Receiver, hopping between frequencies in synchronization with transmitter, picks up message
- Advantages
 - Eavesdroppers hear only unintelligible blips
 - Attempts to jam signal on one frequency succeed only at knocking out a few bits

Frequency Hoping Spread Spectrum

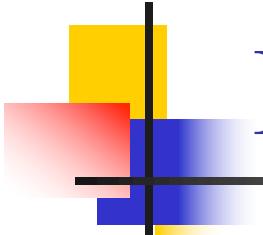


(a) Channel assignment



(b) Channel use

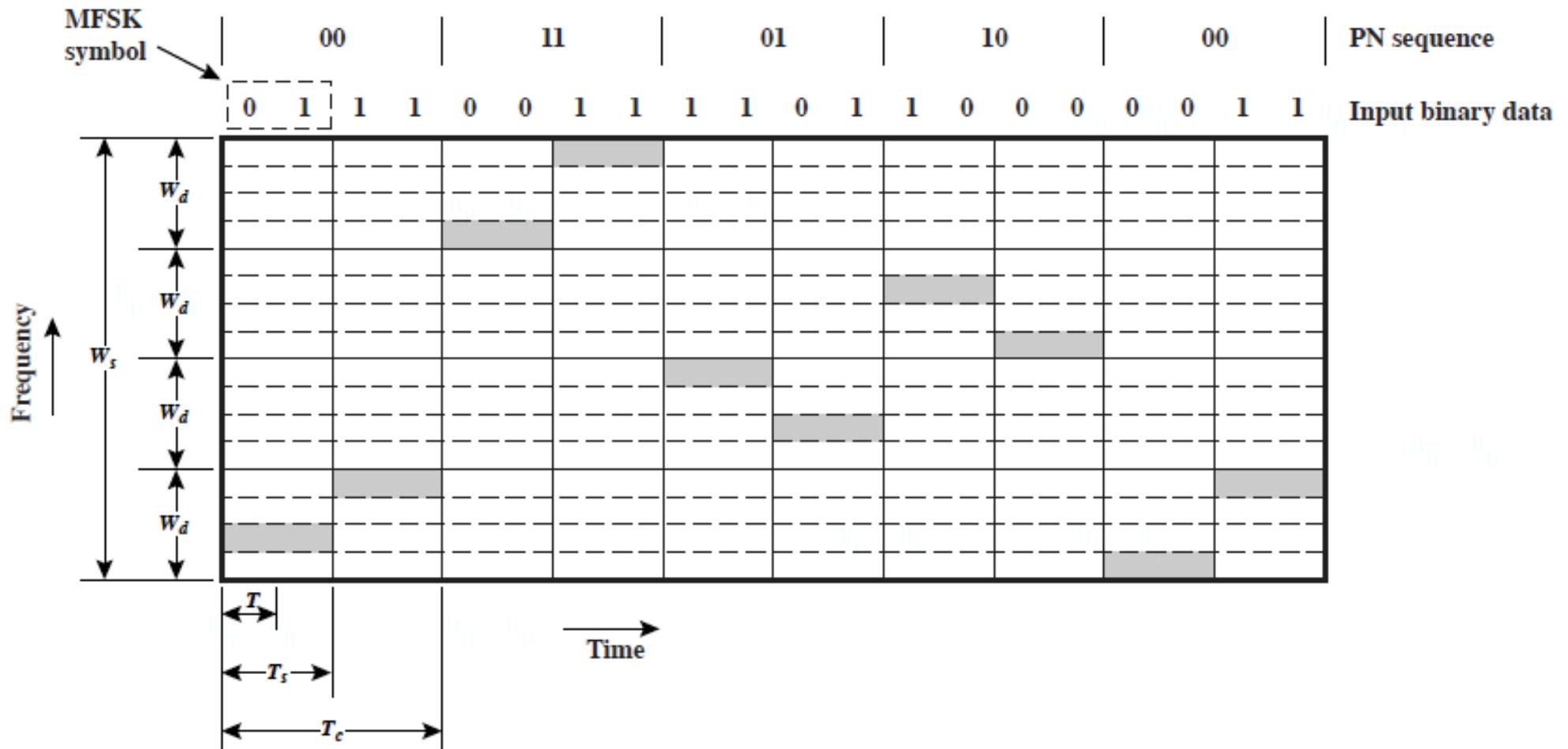
Figure 7.2 Frequency Hopping Example



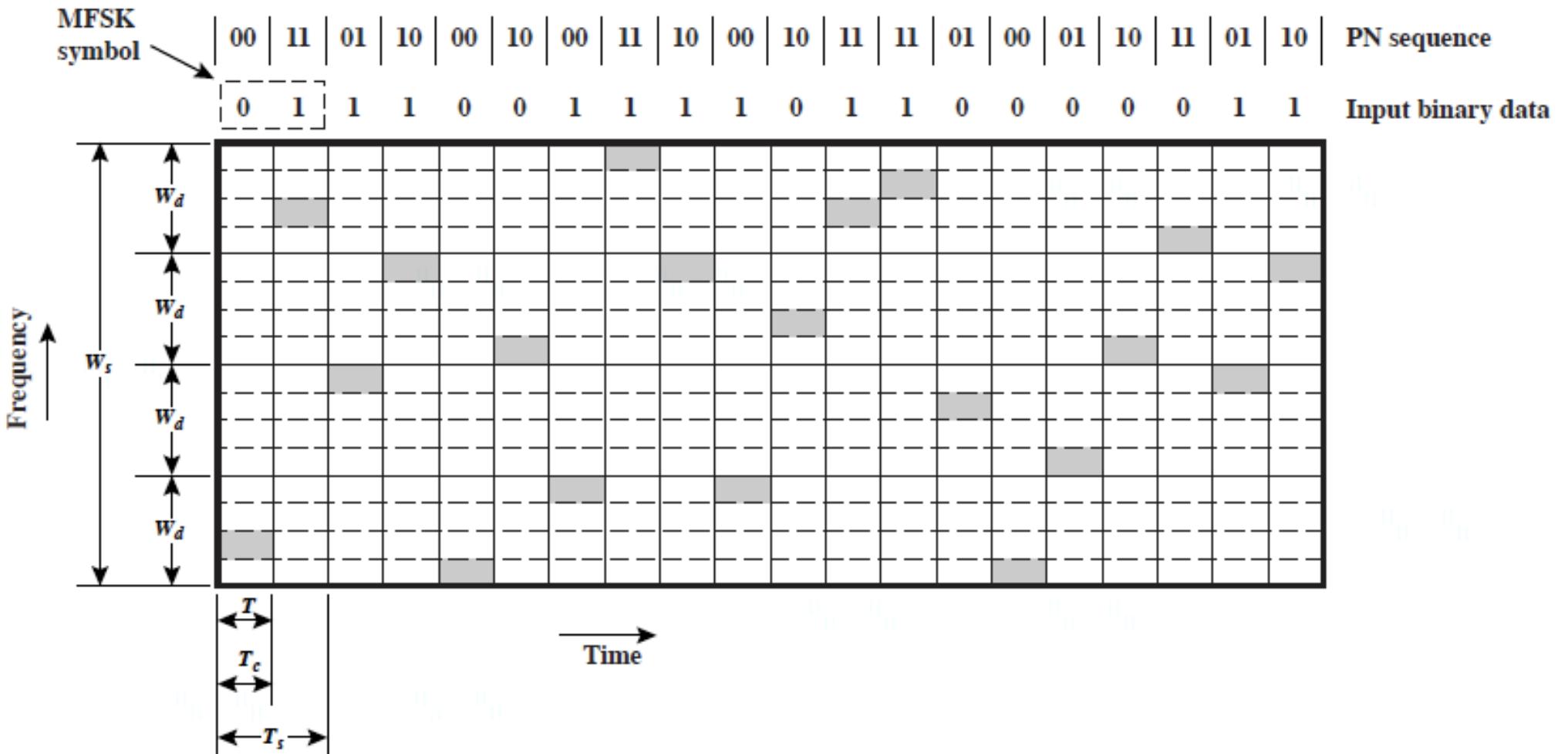
FHSS Using MFSK (1)

- MFSK signal is translated to a new frequency every T_c seconds by modulating the MFSK signal with the FHSS carrier signal
- For data rate of R :
 - duration of a bit: $T = 1/R$ seconds
 - duration of signal element: $T_s = LT$ seconds
- $T_c \geq T_s$ - slow-frequency-hop spread spectrum
- $T_c < T_s$ - fast-frequency-hop spread spectrum

FHSS Using MFSK, slow

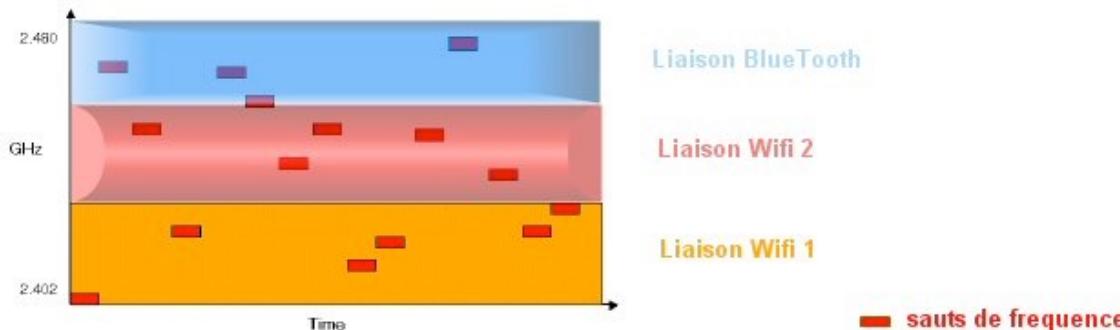


FHSS Using MFSK, fast



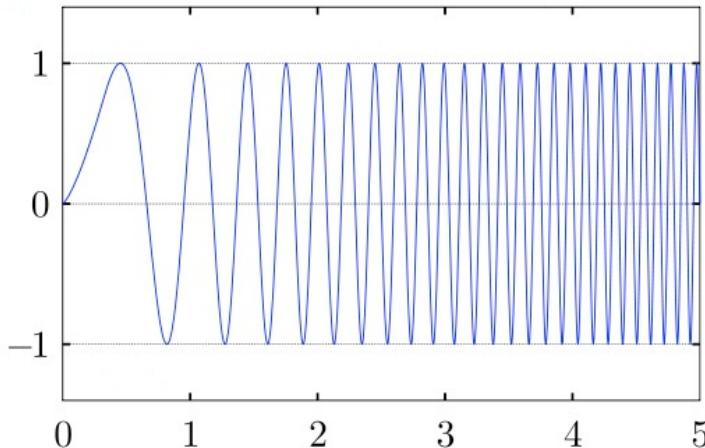
FHSS dans 802.11

- La séquence de fréquences utilisées est connue de tous donc ne sert plus à la sécurisation des échanges.
- La bande de fréquence 2.4 - 2.4835 GHz permet de créer 79 canaux de 1 MHz. La transmission passe d'un canal à un autre pendant une courte période de temps d'environ 400 ms.
- Réduit les interférences entre les transmissions des diverses stations d'une cellule.
- En théorie, jusqu'à 15 réseaux différents peuvent cohabiter dans une même zone.



Chirp spread spectrum (CSS)

- A chirp is a sinusoidal signal whose frequency increases or decreases over a certain amount of time



- As with other spread spectrum methods, CSS uses its entire allocated bandwidth to broadcast a signal, making it robust to channel noise.
- However, it is unlike DSSS or FHSS in that it does not add any pseudo-random elements to the signal
- CSS is ideal for applications requiring low power usage and needing relatively low data rates (1 Mbit/s or less)

Synthèse: quelques exemples concrets

- GSM (2G) utilise GMSK qui est une variante Gaussienne de MSK, lui même variante en phase continue de FSK
- GPRS (2.5G) utilise GMSK alors que EDGE (2.75G) utilise 8-PSK. Evolved EDGE utilise 32 et 64-QAM
- En 3G, HSDPA utilise du 4-PSK (QPSK), du 16-QAM et du 64-QAM selon les conditions radio
- La plupart des systèmes 3G utilise CDMA pour le multiplexage, au contraire de GSM qui utilise le TDMA
- WiFi 802.11b à 11Mbits/s utilise DSSS, et une variante appelé CCK (Complementary Code Keying) qui utilise des chips de 8 bits en QPSK (au lieu de 11 bits pour la version 2Mbits/s)
- BlueTooth utilise une variante de FHSS (Adaptive)
- WiFi 802.11a/g utilisent OFDM, DSL utilise OFDM (DMT) et CAP (QAM) même si ce dernier est obsolète
- IEEE 802.15.4 (PHY de ZigBee) utilise DSSS, CSS, MPSK, BPSK selon les versions
- LoRa utilise le Chirp Spread Spectrum (CSS)