

Cours M2 TI: Réseaux Emergents Sans Fils

Eléments de transmission physique

C. Pham

Université de Pau et des Pays de l'Adour

Département Informatique

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

Congduc.Pham@univ-pau.fr



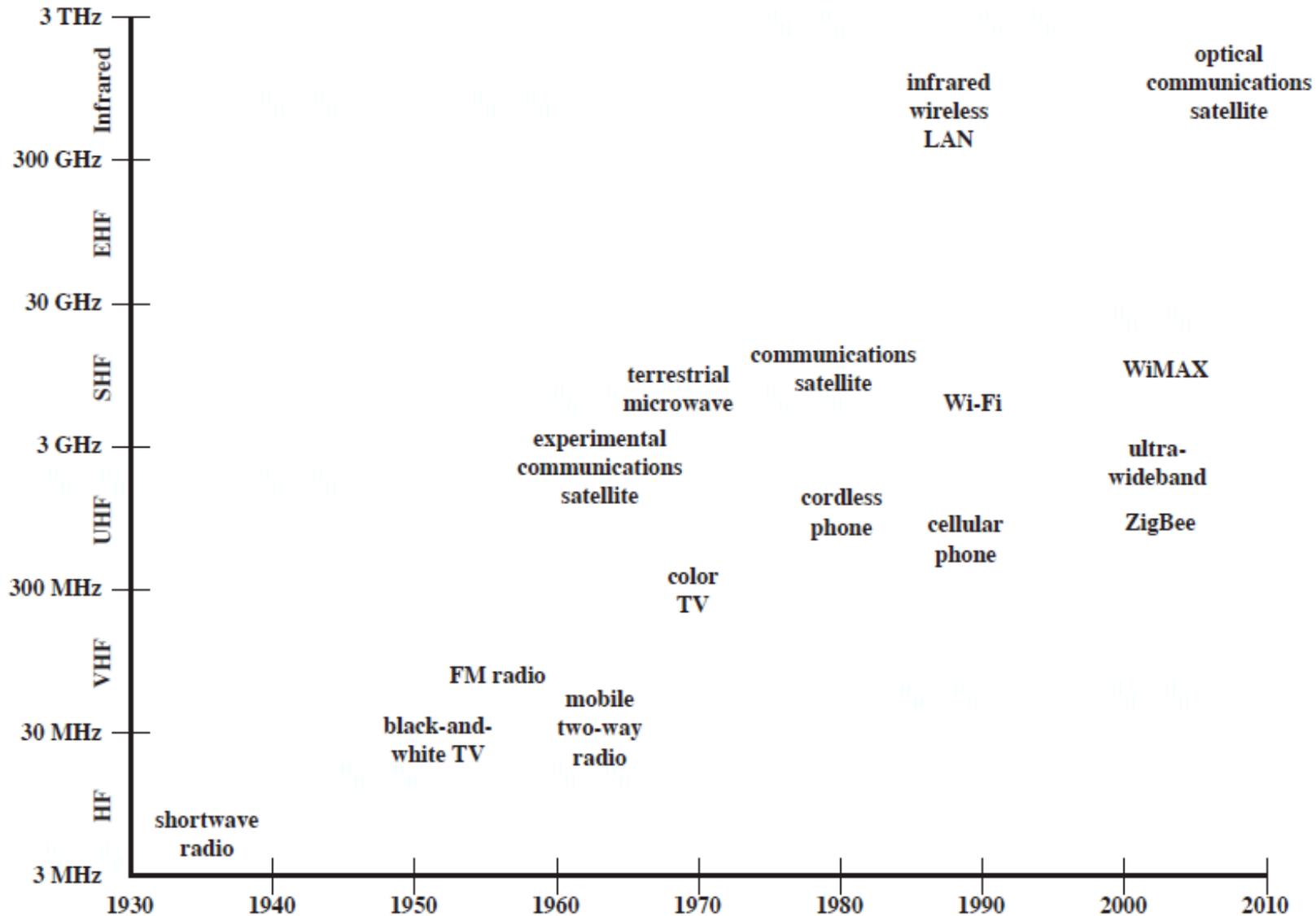
Historique

- **1898 : 1ère communication mobile (Marconi, puis Armée US)**
- **1948 : Invention du transistor, théorie de Shannon**
- **1950 : nombreuses communications mobile professionnelles**
- **1958 : 1er réseau cellulaire public (Allemagne)**
- **1962 : 1er satellite TV (Telsar I)**
- **1962 : 1er satellite géostationnaire (Intelsat I)**
- **1964 : Transmission de données sur RTC**
- **1969 : Internet**
- **1970 : Bell / 1G, analogique**

Historique

- 1980 : début des systèmes sans cordon
- 1983 : Études GSM (numérique)
- 1985 : Études DECT
- 1988 : Débuts GSM / Études CDMA
- 1990 : IEEE 802.11 Wireless LAN
- 1990 : Messagerie unilatérale (étape)
- 1991 : Déploiement GSM numérique=2G
- 1993 : DEC 1800, début IS-95 (CDMA) aux US
- 2000 : WiMax, UWB, ZigBee
- 2001 : 2,5G, GPRS, EDGE
- 2002 : 3G, UMTS
- 2005: 3,5G ou 3G+, HSDPA
- 2012: 3,5G, LTE, 4G

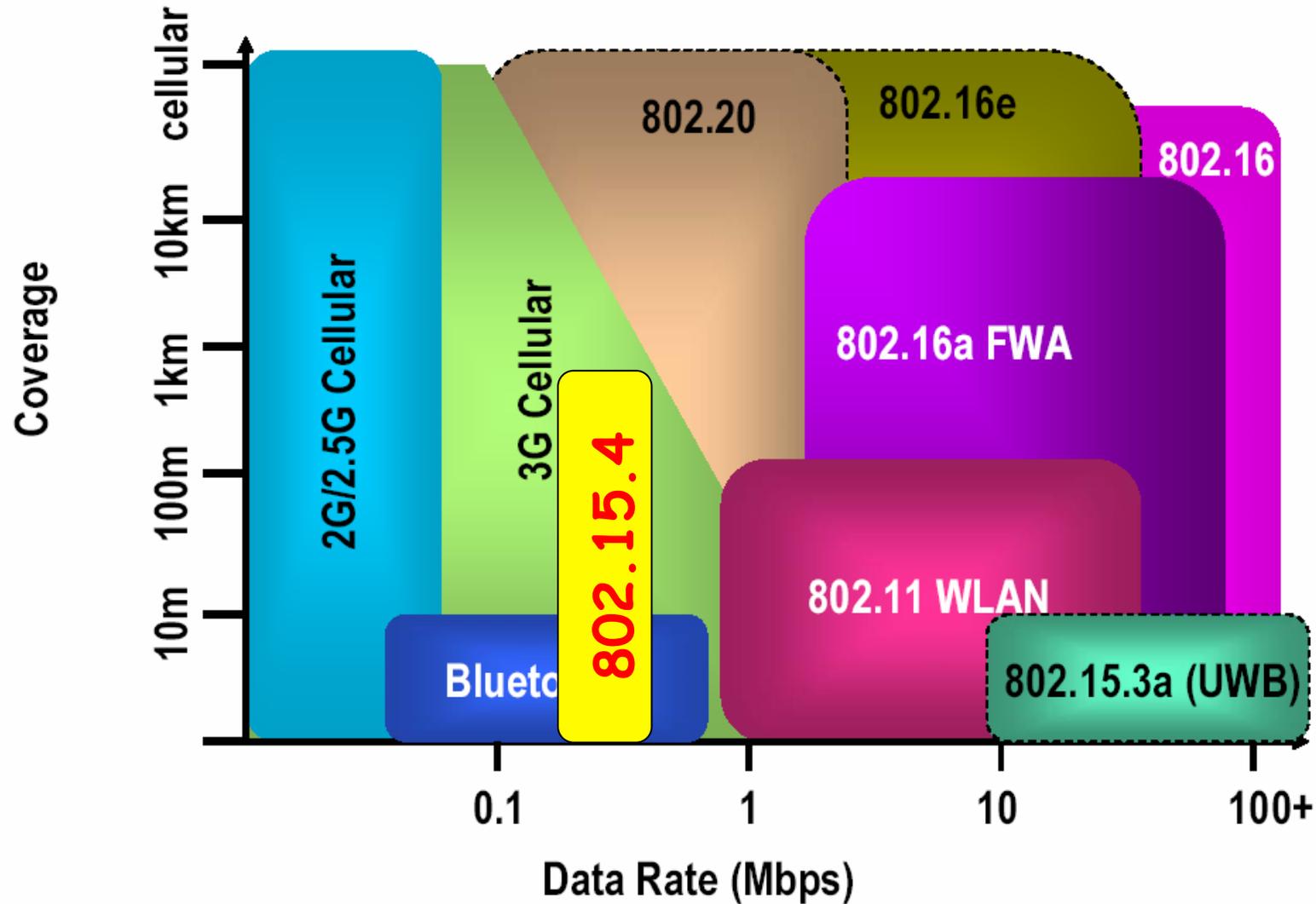
Etapes marquantes



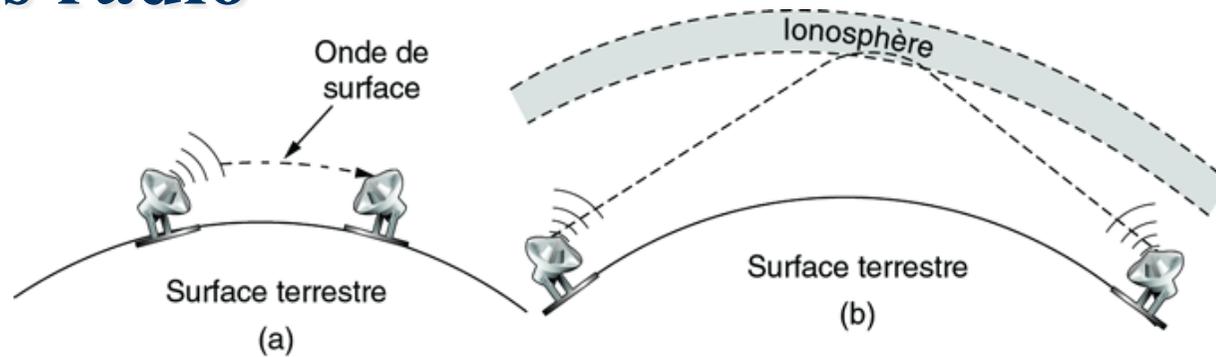
Source W. Stallings

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

Technologies radio sans-fils grand public



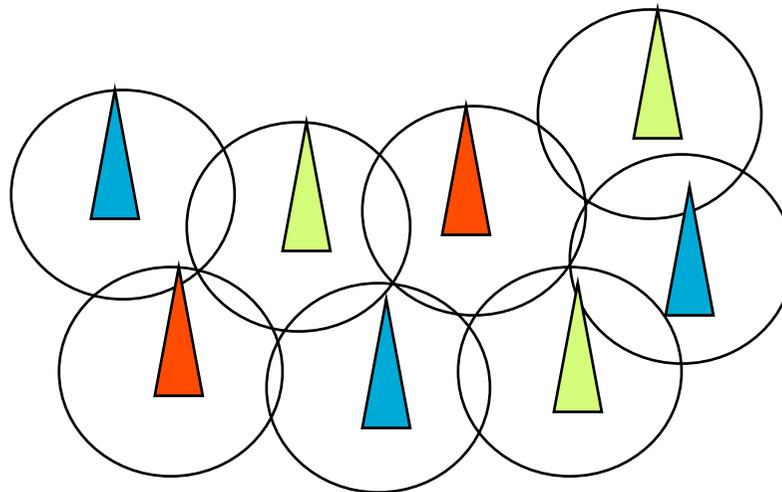
Liaisons radio



© Pearson Education France

■ Sans fils

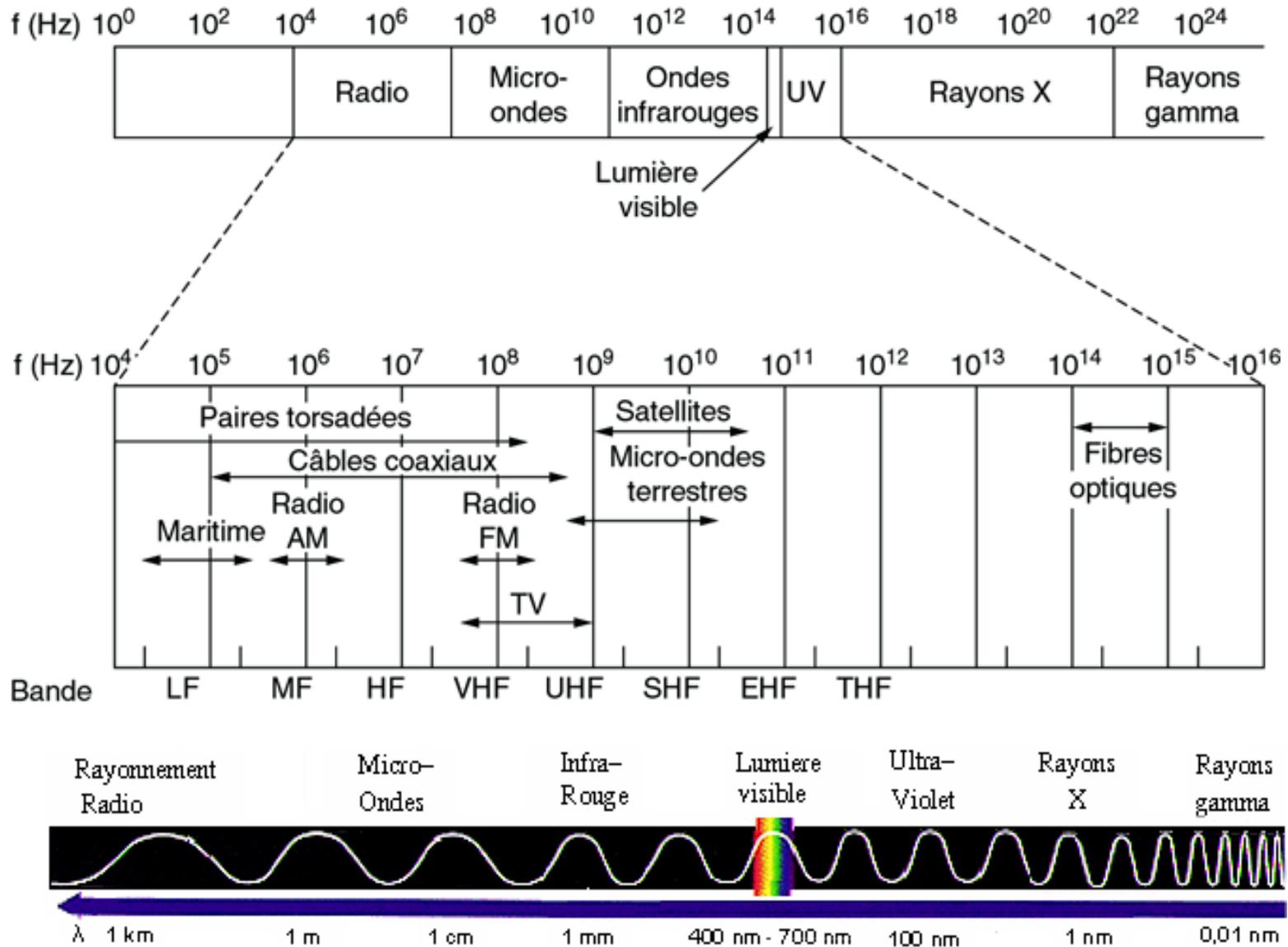
- infrastructure moins coûteuse, mais
- erreurs plus fréquentes et dépendantes des conditions climatiques.



AM, FM (radio)
UHF (TV)
GSM
UMTS
WIFI-WIMAX
...

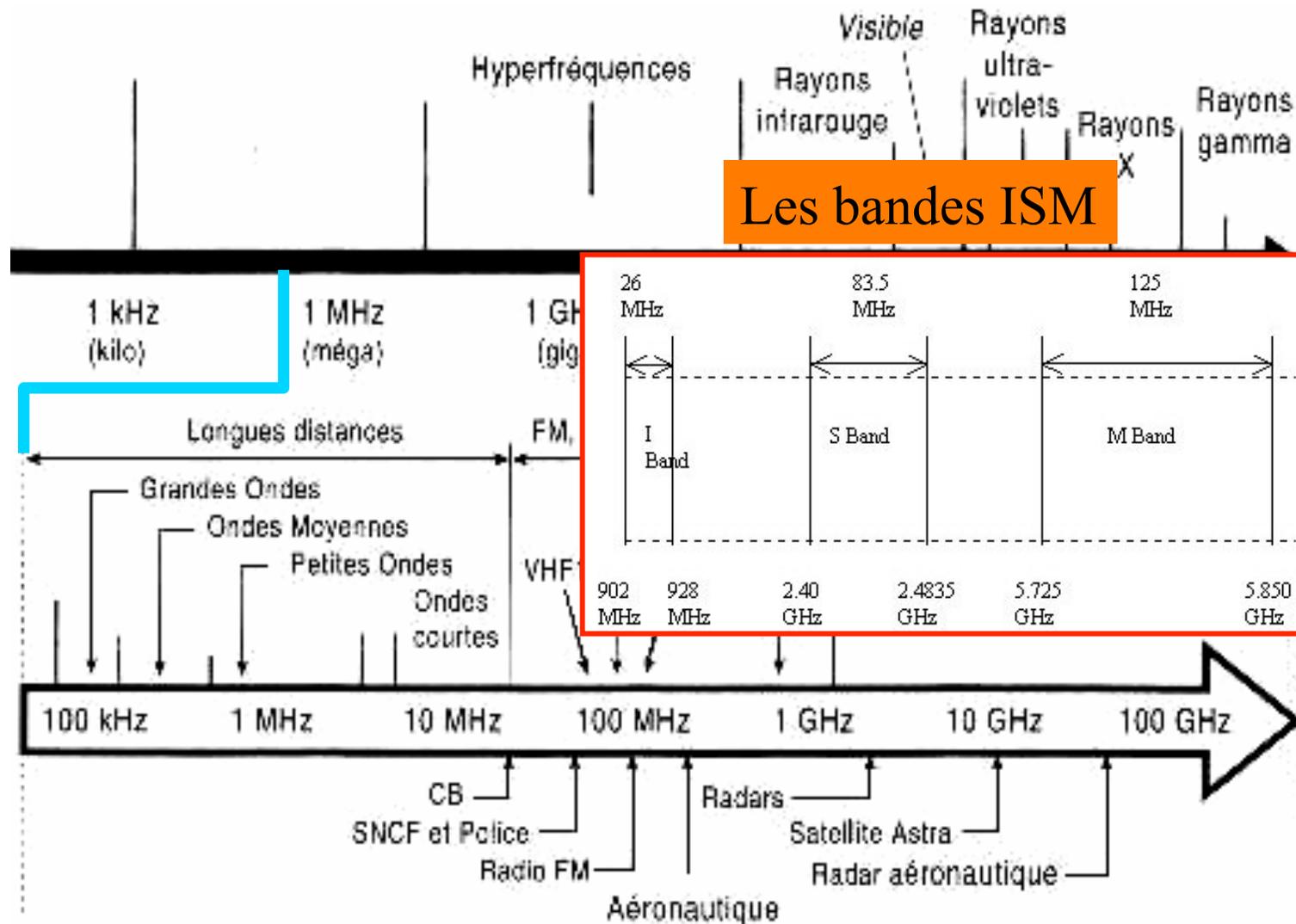
Auteur: C. Pham, Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)

Le spectre électromagnétique



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

Utilisation des bandes de fréquences



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

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

Agence nationale des fréquences (www.afnr.fr)

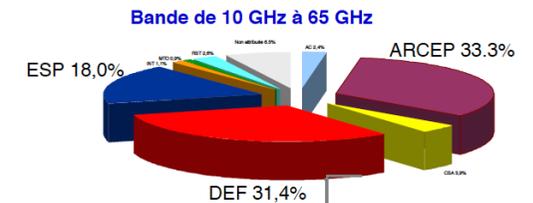
- + des fréquences utilisables pour certains matériels de faible puissance et de faible portée
- Exemple :

Bande des fréquences	2400 à 2454 MHz
Puissance max.	100 mW
Largeur canal	non imposée
Références	Décisions ART N°xxx



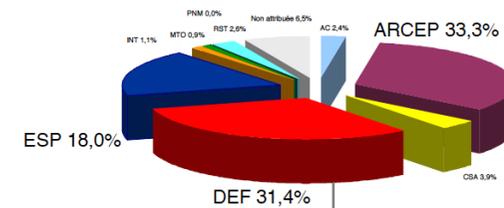
Répartition des attributions de bandes de fréquences entre affectataires à titre primaire dans les principales gammes de fréquences

Satellites



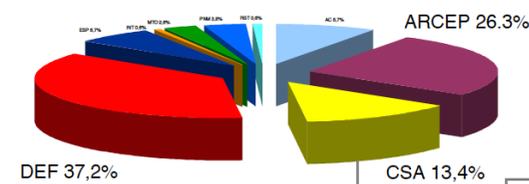
Fixe

Bande de 3,4 GHz à 10 GHz



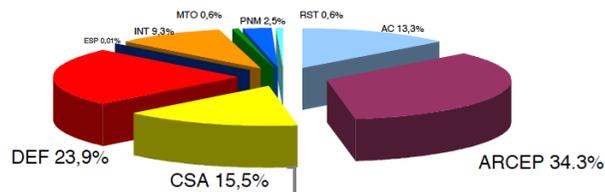
Mobile, radiolocalisation et radiodiffusion

Bande de 29,7 MHz à 3,4 GHz



Liaisons HF

Bande de 9 kHz à 29,7 MHz



9 kHz

29,7 MHz

3,4 GHz

10 GHz

65 GHz

Éléments de transmission de données

- Chaque support de transmission permet un certain nombre de changement d'états par seconde (rapidité de modulation, R_m) 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?
- $D=R_m.\log_2 V$

Débit maximum d'un canal de transmission

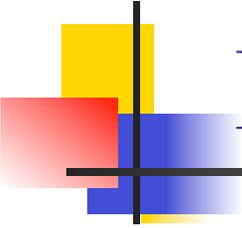
- Si un signal quelconque est appliqué à l'entrée d'un filtre passe-bas ayant une bande passante W , le signal ainsi filtré peut être reconstitué avec un échantillonnage à $2W$ Hz (Nyquist, Shannon)

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

si le signal comporte V niveaux significatifs (Valence).

- Le théorème de Shannon-Hartley donne le débit maximum sur une ligne bruitée (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 ; $\text{SNR}_{\text{dB}} = 24 \text{ dB}$

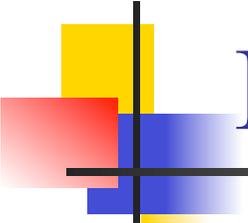
$$B = 4 \text{ MHz} - 3 \text{ MHz} = 1 \text{ MHz}$$

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

$$\text{SNR} = 251$$

- 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?

$$C = 2B \log_2 M$$

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

$$4 = \log_2 M$$

$$M = 16$$

Modulation

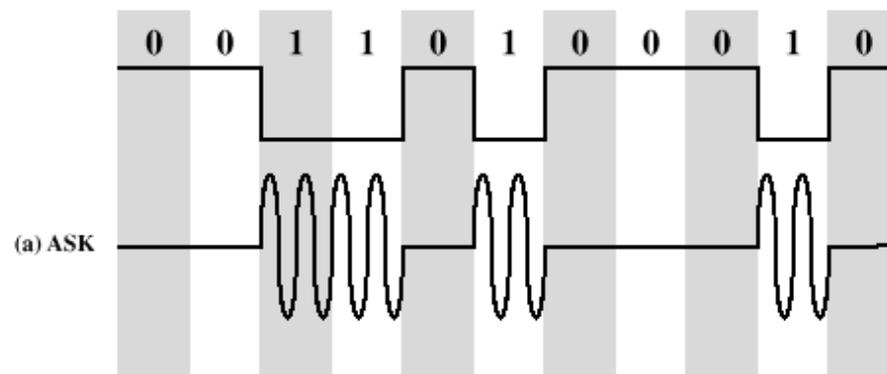
- **La modulation est la transformation d'un message à transmettre en un signal adapté à la transmission sur un support physique.**
- **Les objectifs de la modulation sont:**
 - une transposition dans un domaine de fréquences adapté au support de transmission;
 - une meilleure protection du signal contre le bruit;
 - une transmission simultanée de messages dans les bandes de fréquences adjacentes, pour une meilleure utilisation du support.
- **Trois types de modulation de base existent, en faisant varier les trois paramètres de l'onde porteuse: A_p , f_p , Φ_p .**

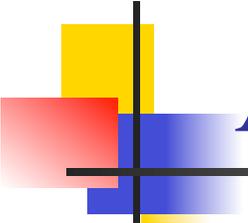
Amplitude-Shift Keying

- 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

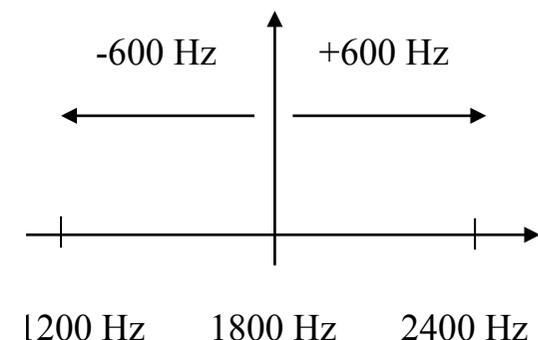
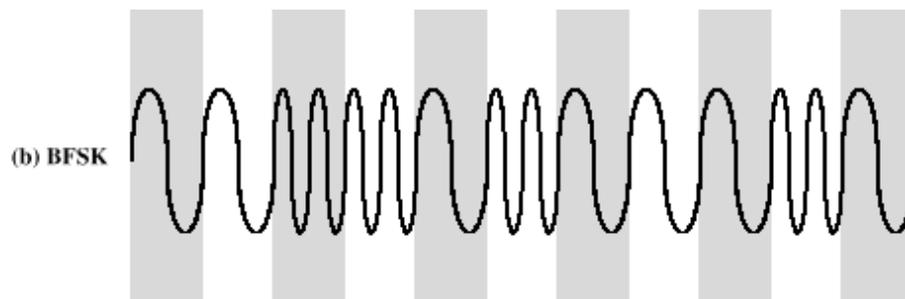
- Susceptible to sudden gain changes
- Inefficient modulation technique
- On voice-grade lines, used up to 1200 bps
- Used to transmit digital data over optical fiber

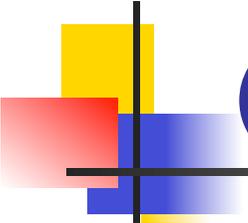
Frequency-Shift Keying: BFSK

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

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

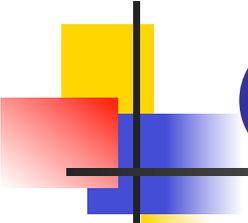
- where f_1 and f_2 are offset from carrier frequency f_c by equal but opposite amounts





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)

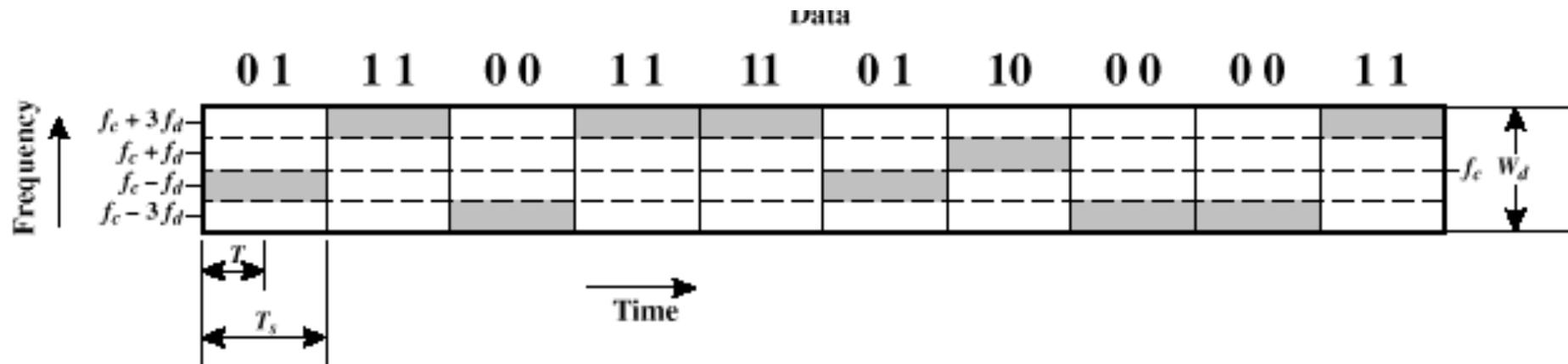
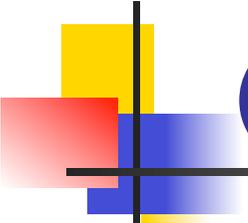


Figure 6.4 MFSK Frequency Use ($M = 4$)

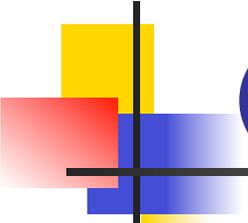


Multiple Frequency-Shift Keying (MFSK)

- To match data rate of input bit stream, each output signal element is held for:

$$T_s = LT \text{ seconds}$$

- where T is the bit period (data rate = $1/T$)
- So, one signal element encodes L bits



Multiple Frequency-Shift Keying (MFSK)

- Total bandwidth required

$$2Mf_d$$

- Minimum frequency separation required

$$2f_d = 1/T_s$$

- Therefore, modulator requires a bandwidth of

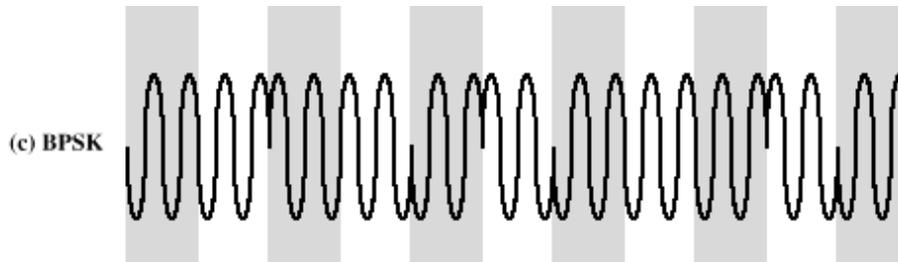
$$W_d = 2L/LT = M/T_s$$

Phase-Shift Keying (PSK)

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

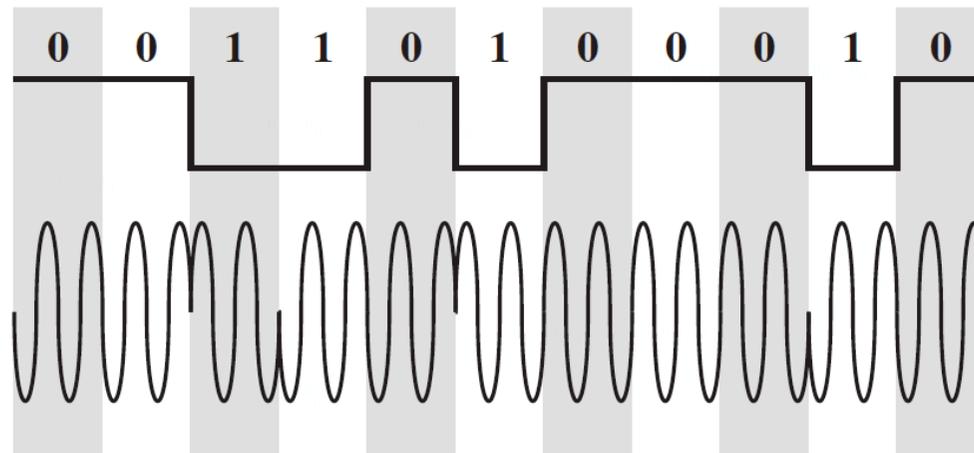
$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{binary 0} \end{cases}$$

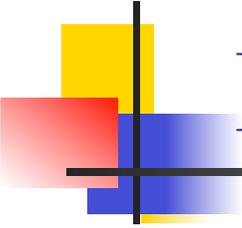
$$= \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ -A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 0} \end{cases}$$



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

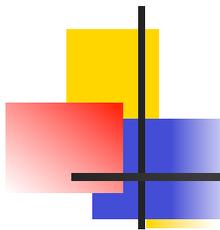




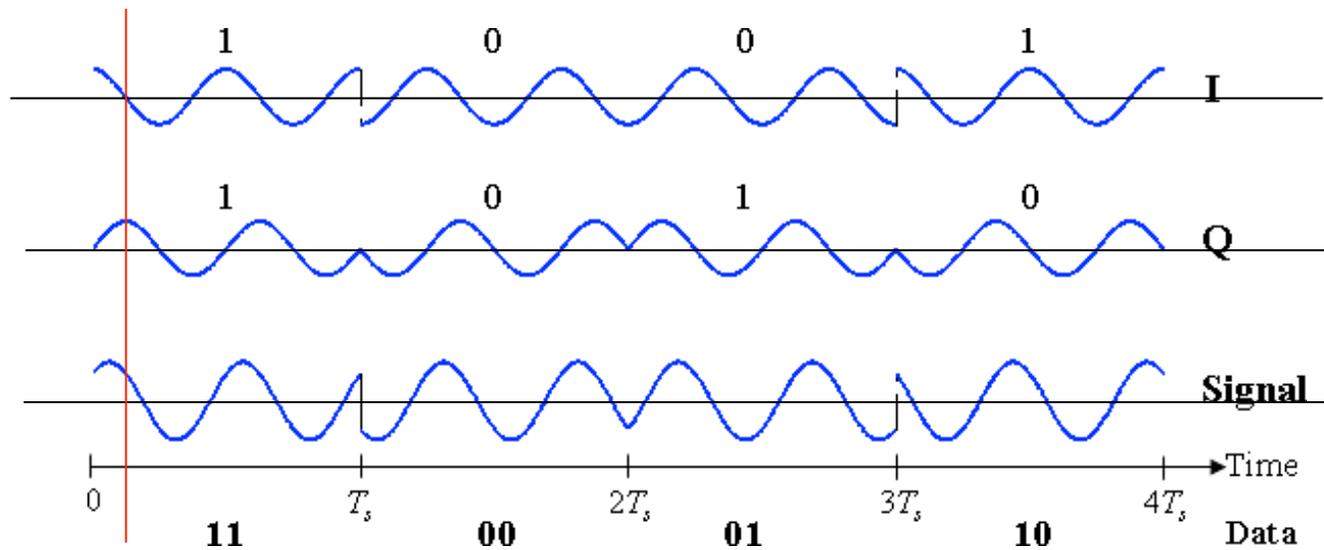
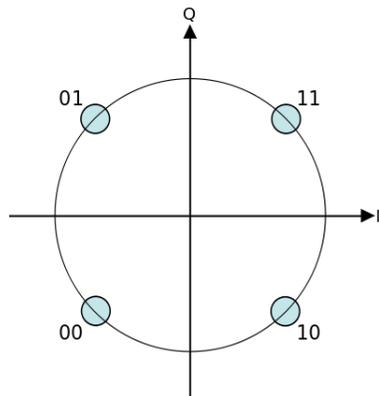
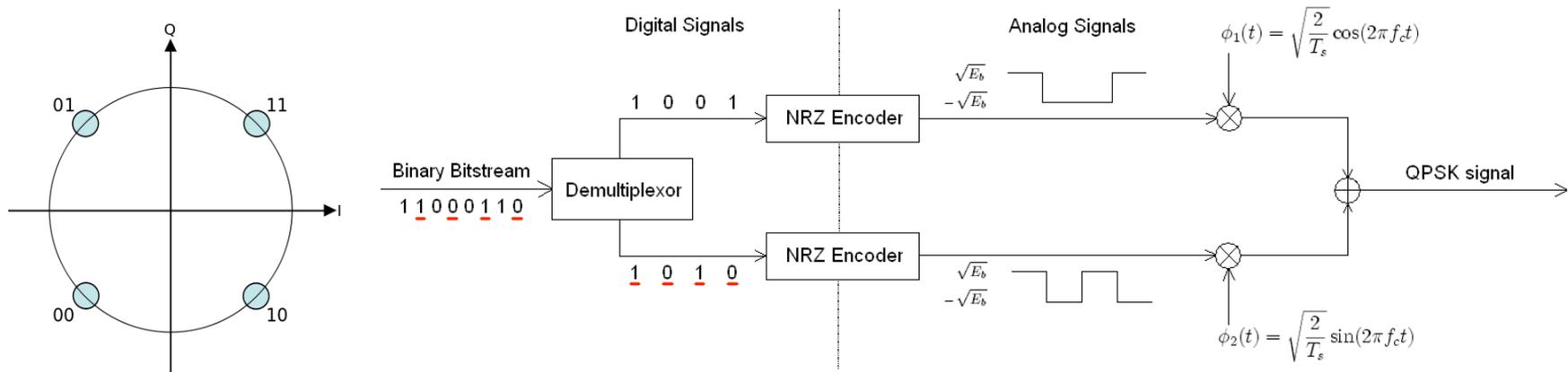
Phase-Shift Keying (PSK)

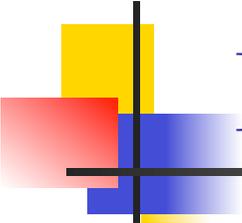
- Four-level PSK (QPSK or 4-PSK)
 - Each element represents more than one bit

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



QPSK



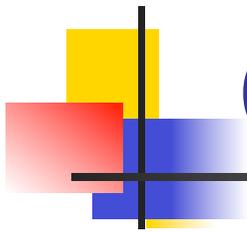


Phase-Shift Keying (PSK)

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

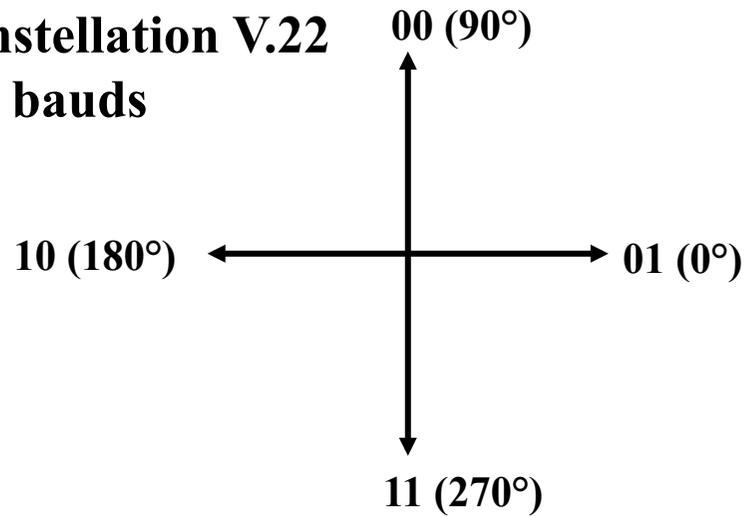
$$D = \frac{R}{L} = \frac{R}{\log_2 M}$$

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

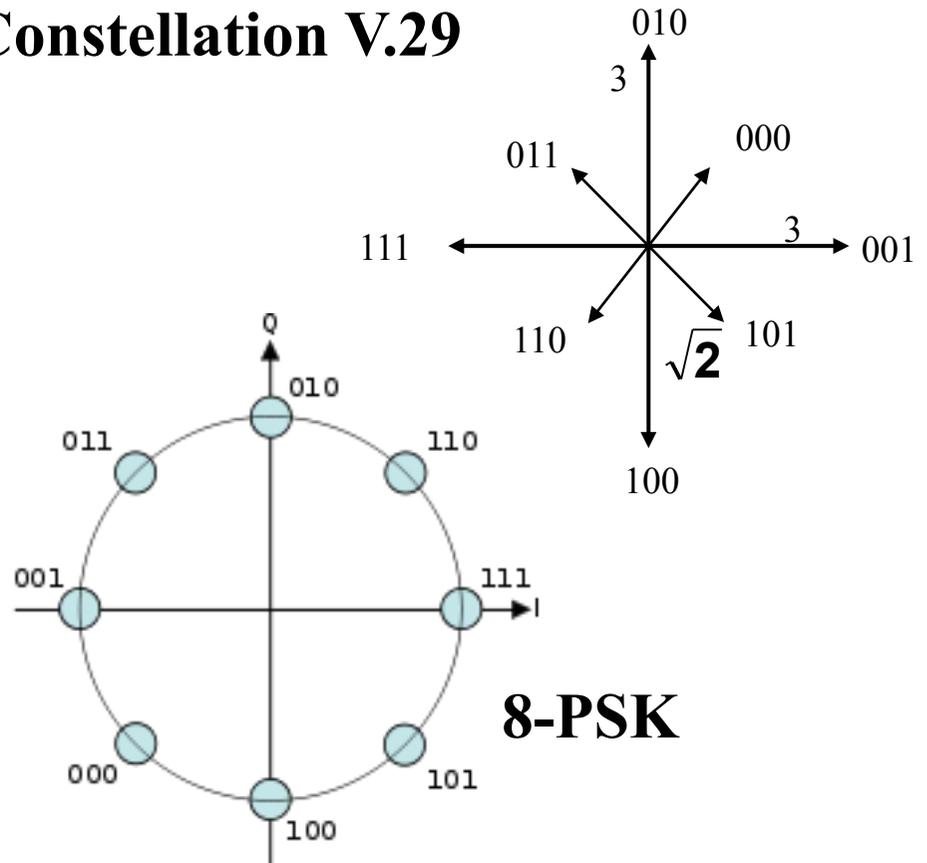


QPSK and MPSK

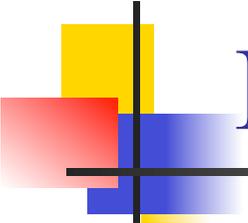
Constellation V.22
600 bauds



Constellation V.29



8-PSK



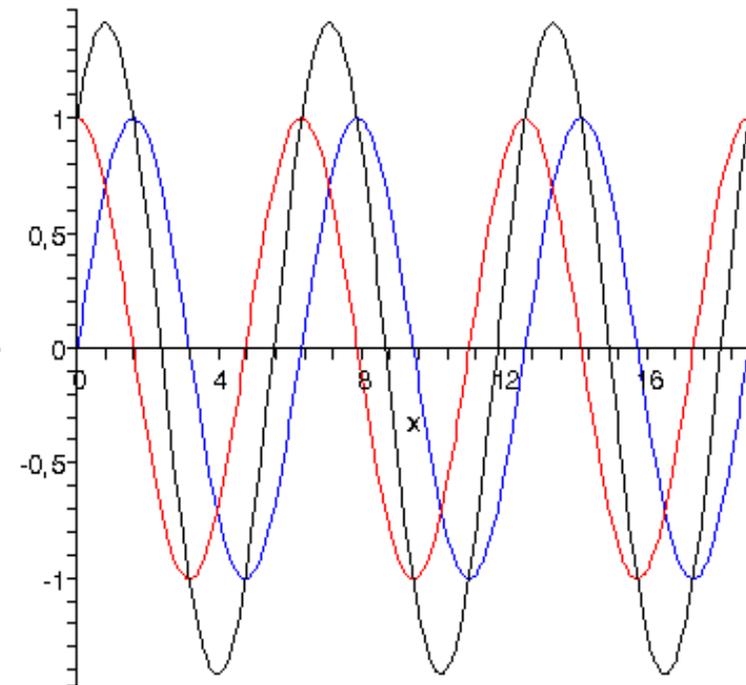
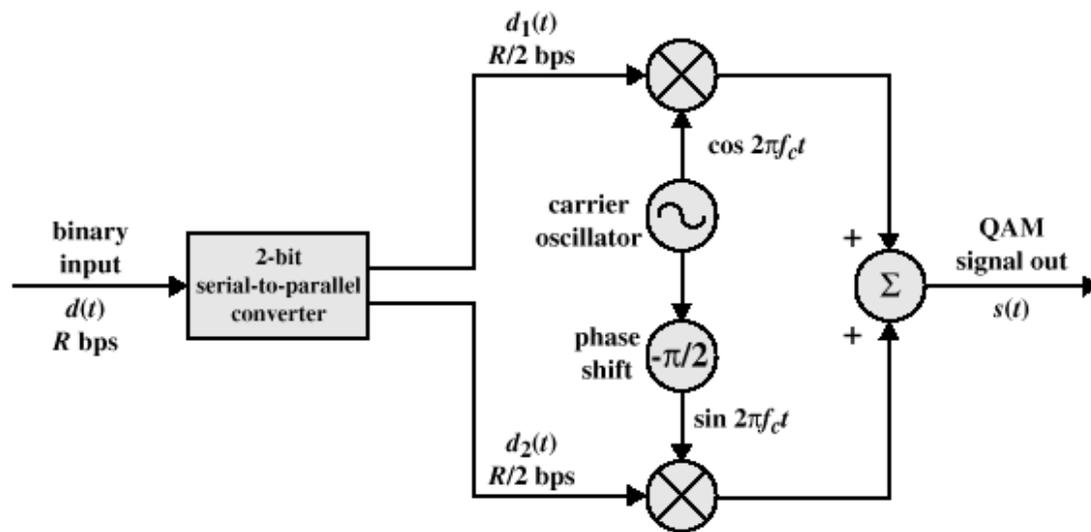
Quadrature Amplitude Modulation

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

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

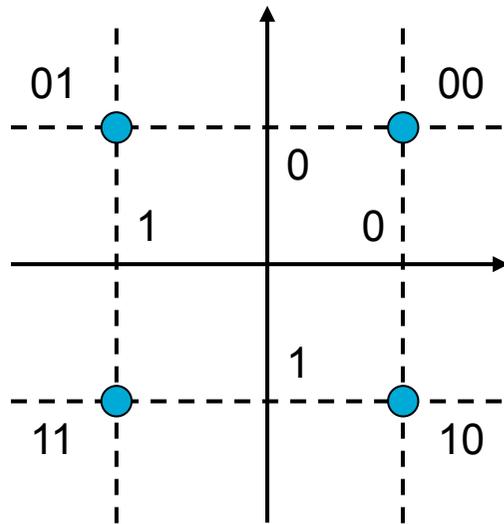
- Amplitude modulating two carriers in quadrature can be equivalently viewed as both amplitude modulating and phase modulating a single carrier.

QAM modulator

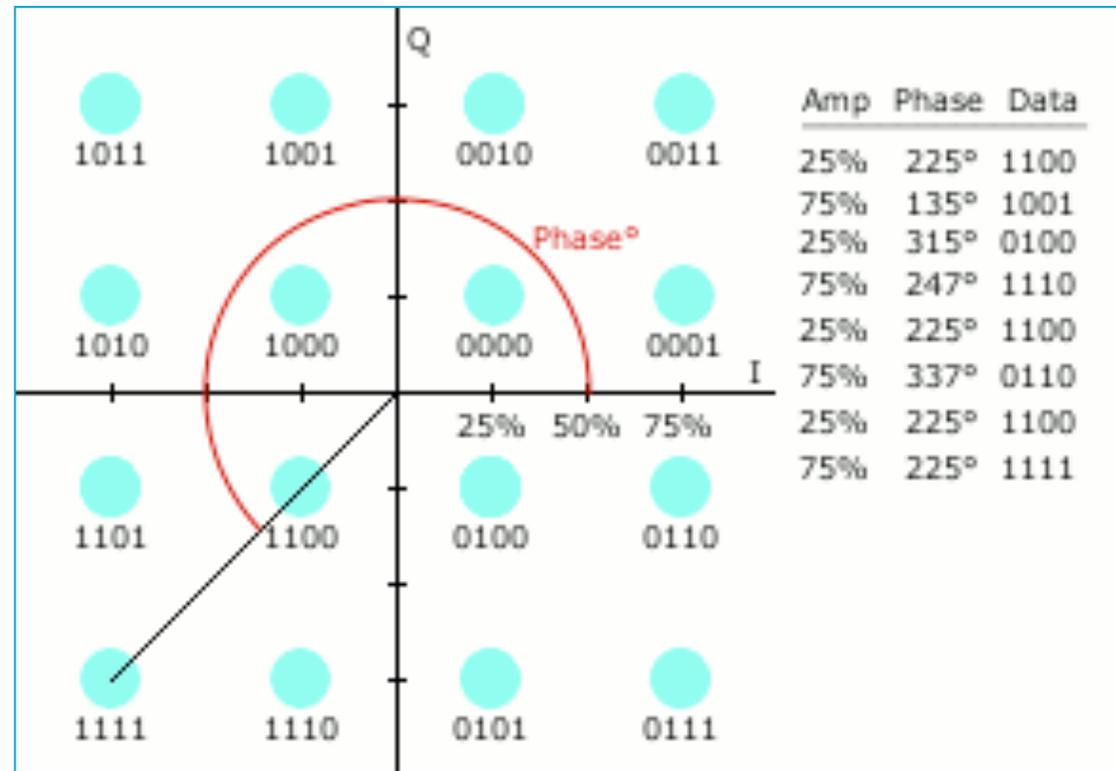


4-QAM, 16-QAM

Modulation de phase
4 états (2 bits)



Quadrature Amplitude Modulation
QAM 16



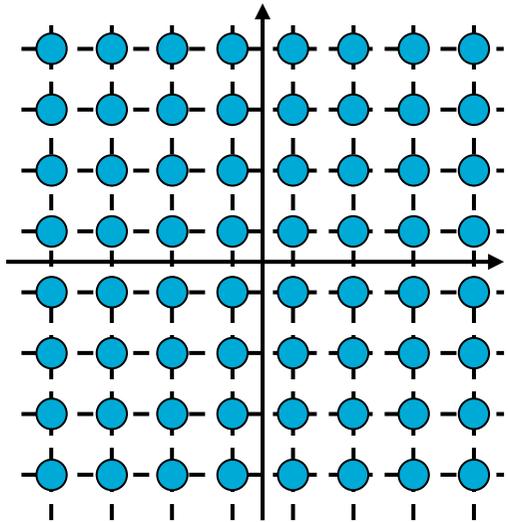
Source wikipedia

Source F. Dupond

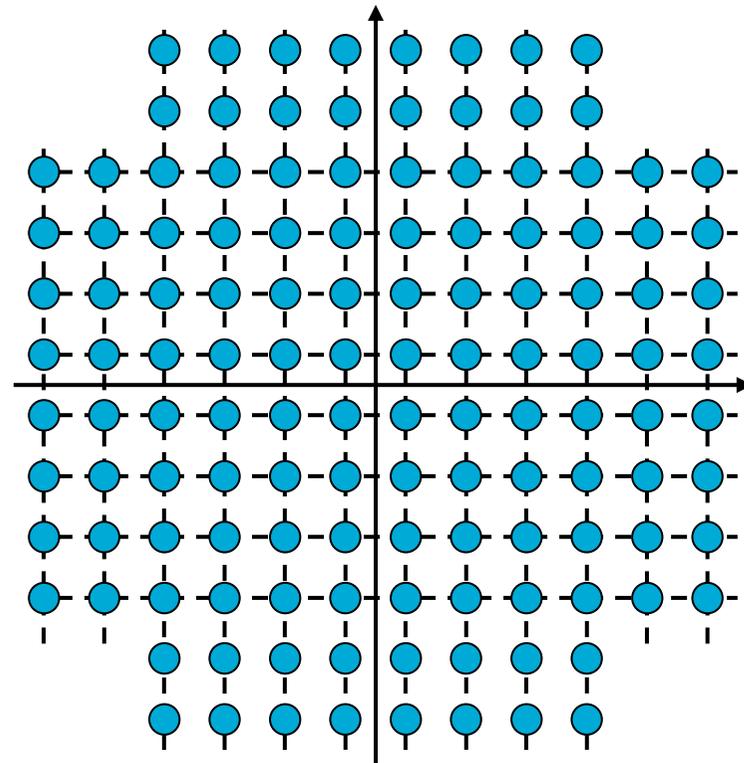
Auteur: C. Pham, Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)

64-QAM, 128-QAM

Quadrature Amplitude Modulation
QAM 64
64 états (6 bits)



Quadrature Amplitude
Modulation
QAM 128
128 états (7 bits)

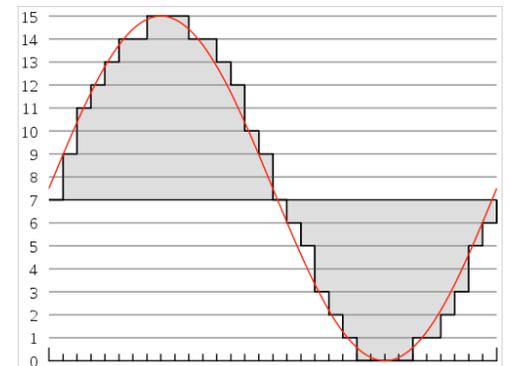
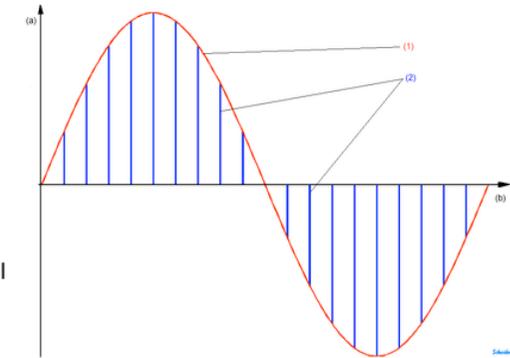
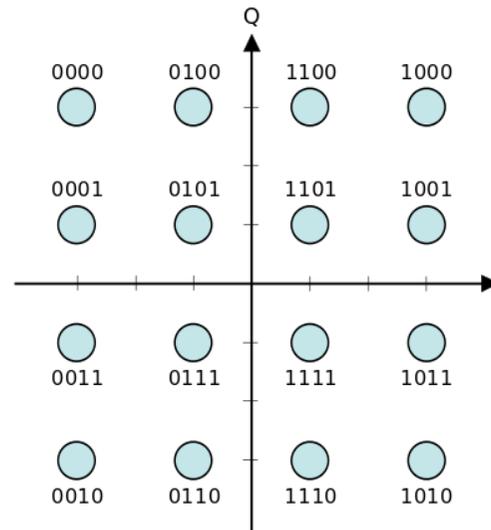
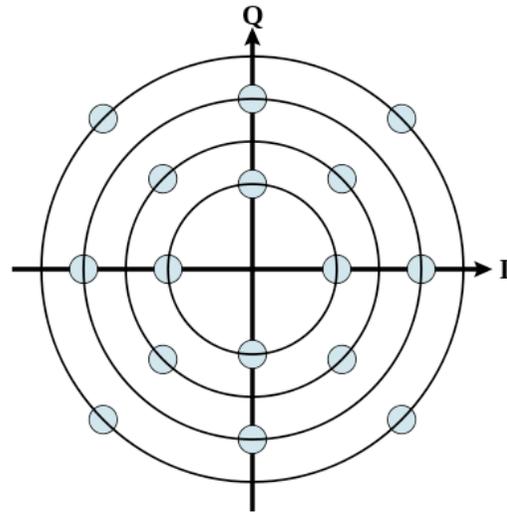
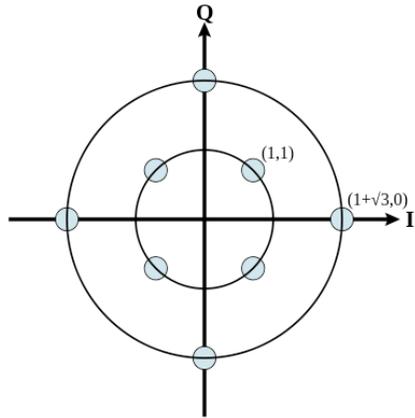


Source F. Dupond

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

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)

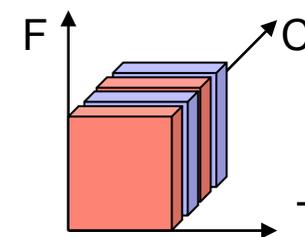
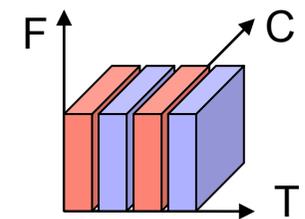
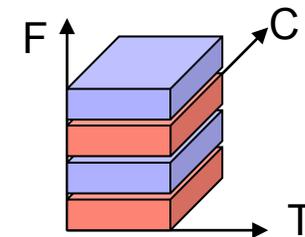
- **multiplexage temporel** :

MRT (Multiplexage à Répartition dans le Temps)

TDM (Time Division Multiplexing)

- **multiplexage par code**

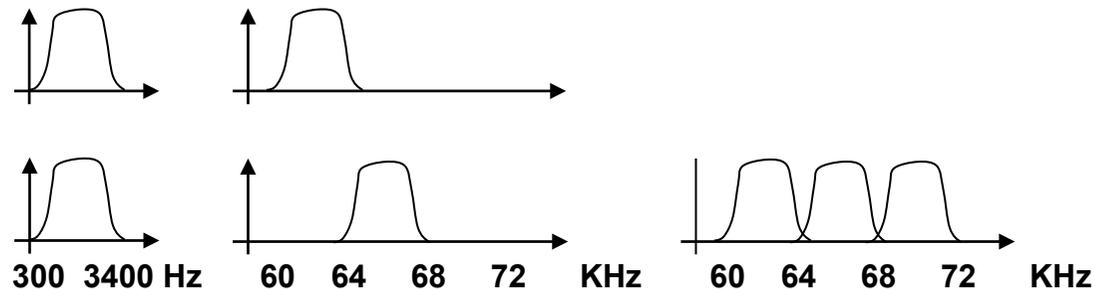
CDM (Code Division Multiplexing)



Multiplexage fréquentiel de trois canaux téléphoniques

- **3 liaisons téléphoniques multiplexées avec technique FDM.**
- Des filtres appropriés limitent la bande passante à 3100 Hz par canal téléphonique.
- Pour assurer un multiplexage correct, une bande de fréquences de 4000 Hz est attribuée à chaque canal afin de bien les séparer les uns des autres.

Affaiblissement



Bandes de fréquences originales

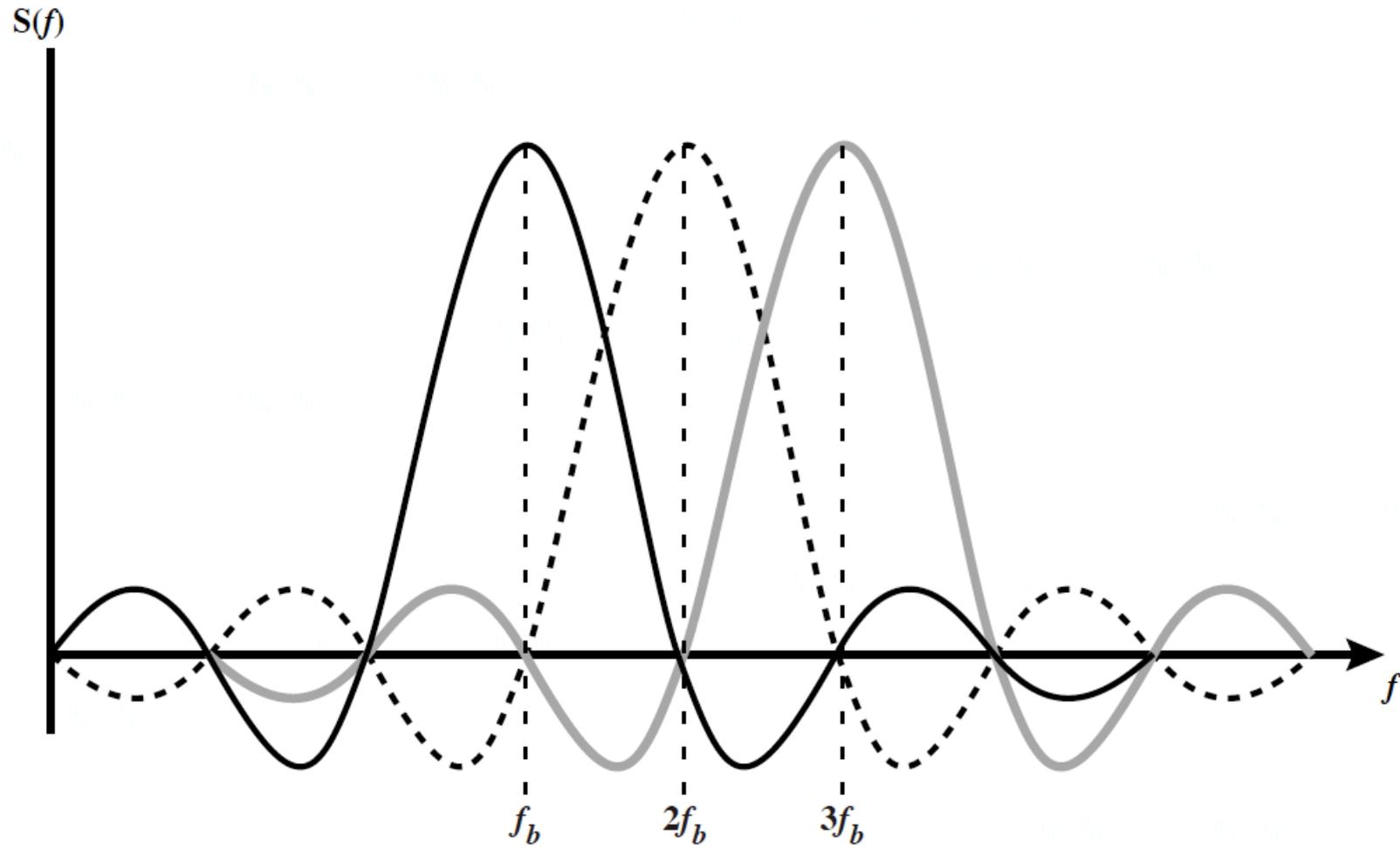
Bandes après transposition en fréquence

Bandes regroupées sur le canal multiplexé

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)

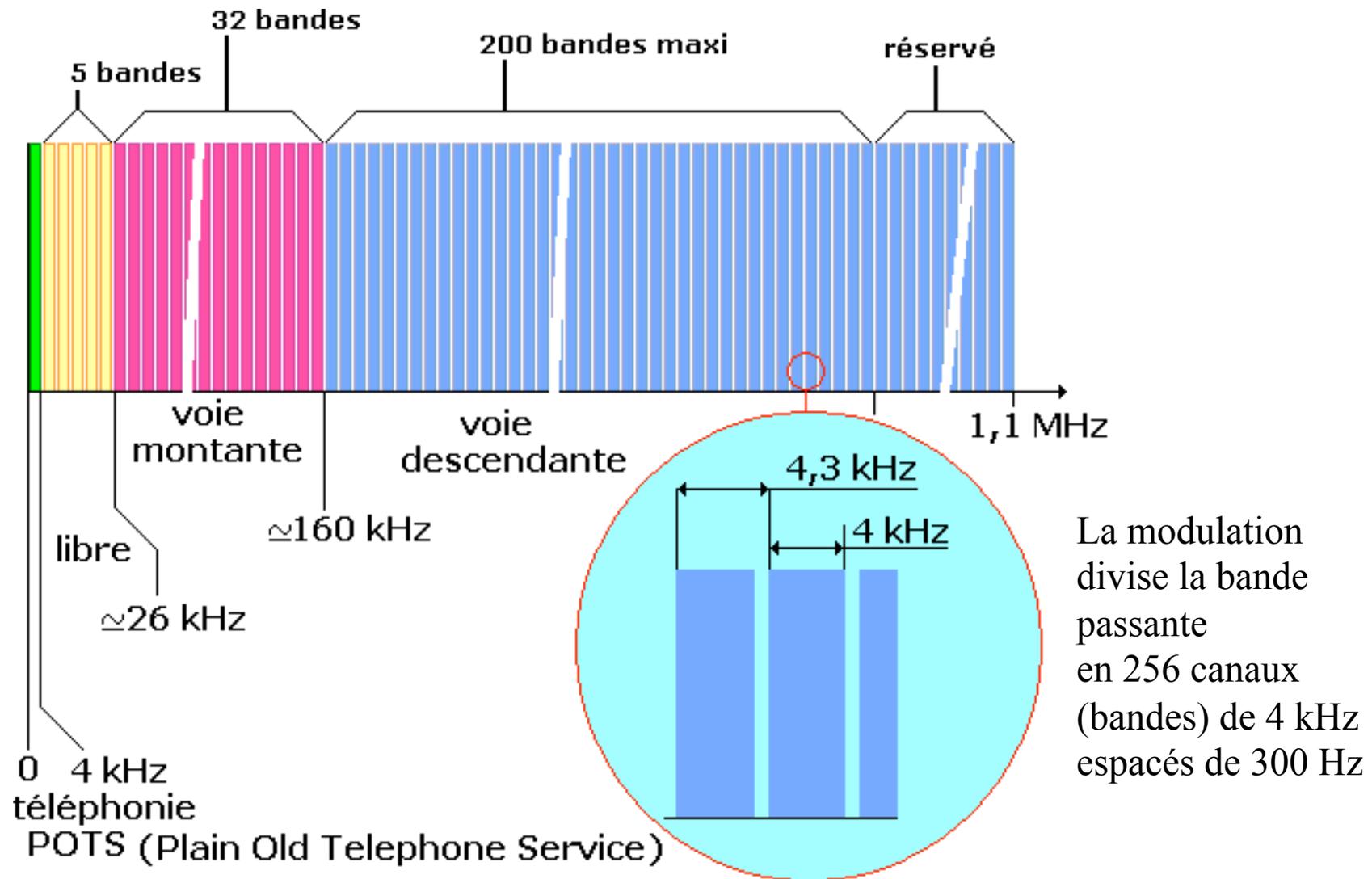
- Principe : diviser le canal principal en sous canaux de fréquence plus faible. Chacun de ces sous canaux est modulé par une fréquence différente, l'espacement entre chaque fréquence restant constant. Ces fréquences constituent une base orthogonale : le spectre du signal OFDM présente une occupation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

OFDM



(b) Three subcarriers in frequency domain

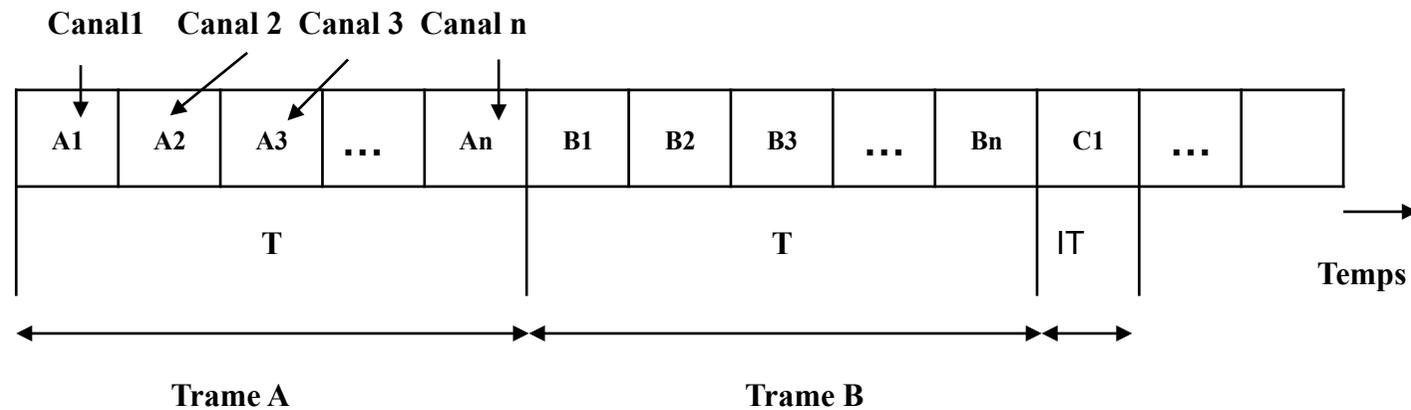
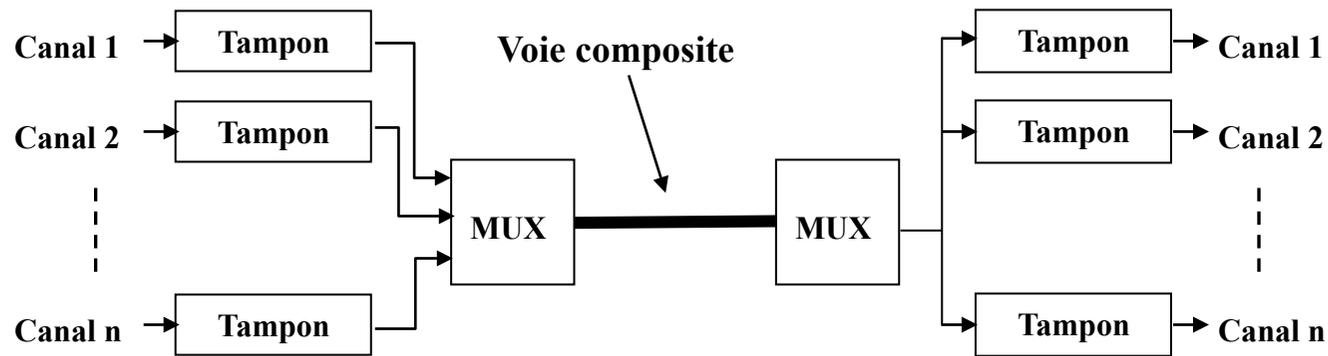
La variante DMT pour DSL



Source <http://sitelec.org/cours/abati/domo/transport.htm>

Multiplexage temporel

⇒ chaque "utilisateur" a pendant un court instant et à tour de rôle, la totalité de la bande passante disponible (généralement réservé aux signaux numériques).



Multiplexage temporel

- La vitesse de transmission des voies bas débit (d) est fonction de la vitesse de transmission de la ligne (D) et du nombre de voies n

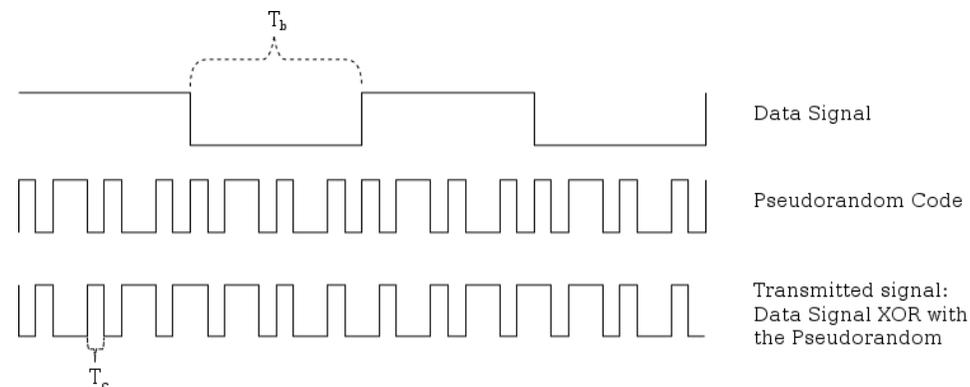
$$d = D/n$$

- La période T des trames est fonction du nombre de voies et de l'intervalle de temps élémentaire IT .

$$T = n \times IT$$

CDMA (Code Division Multiple Access)

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

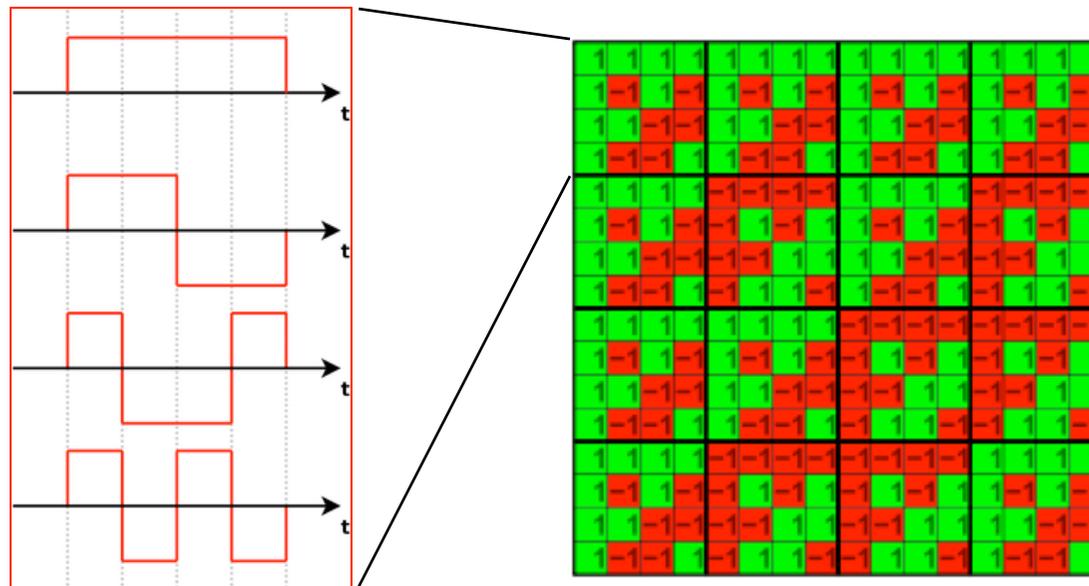


- Exploite les propriétés mathématiques entre les codes orthogonaux. 2 codes sont orthogonaux si le produit scalaire de leur vecteur associés est nul. $u = (a, b)$ and $v = (c, d)$ alors $u.v = a.c+b.d$
- Ex: $u=(1,1)$, $v=(1,-1)$

CDMA, suite

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

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



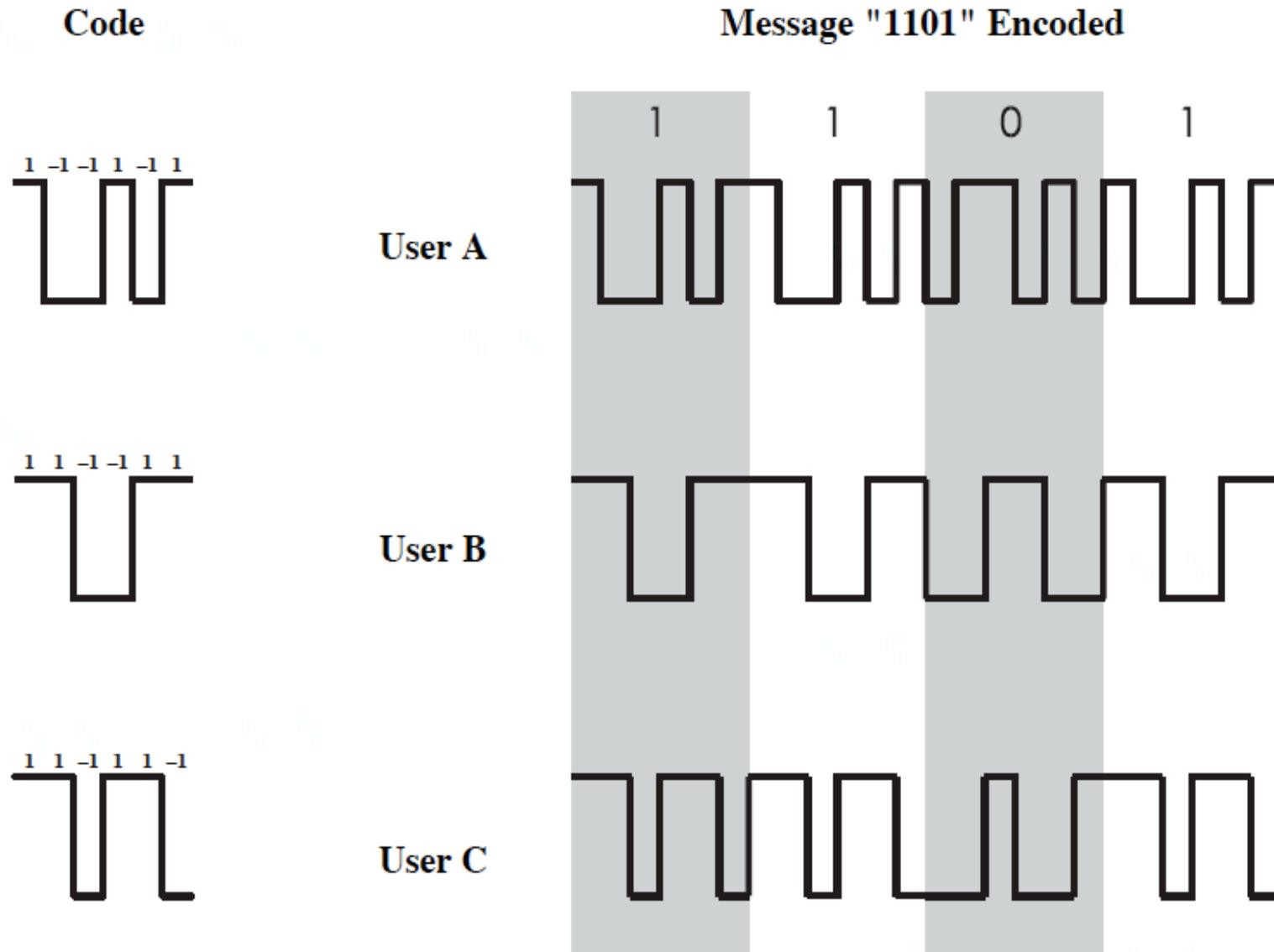
- Le produit scalaire entre 2 lignes ou 2 colonnes est nul. Les codes associés sont orthogonaux.

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



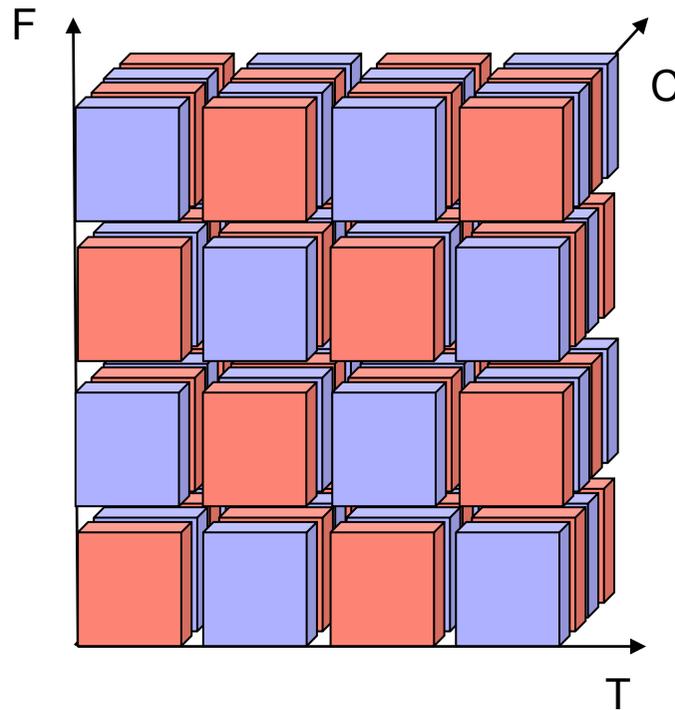
CDMA, transmission et décodage

- 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	code0 = (1, -1), signal = (0, -2, -2, 0, 2, 0, 2, 0)	code1 = (1, 1), signal = (0, -2, -2, 0, 2, 0, 2, 0)
1	decode0 = pattern.vector0	decode1 = pattern.vector1
2	decode0 = ((0, -2), (-2, 0), (2, 0), (2, 0)).(1, -1)	decode1 = ((0, -2), (-2, 0), (2, 0), (2, 0)).(1, 1)
3	decode0 = ((0 + 2), (-2 + 0), (2 + 0), (2 + 0))	decode1 = ((0 - 2), (-2 + 0), (2 + 0), (2 + 0))
4	data0=(2, -2, 2, 2), meaning (1, 0, 1, 1)	data1=(-2, -2, 2, 2), meaning (0, 0, 1, 1)

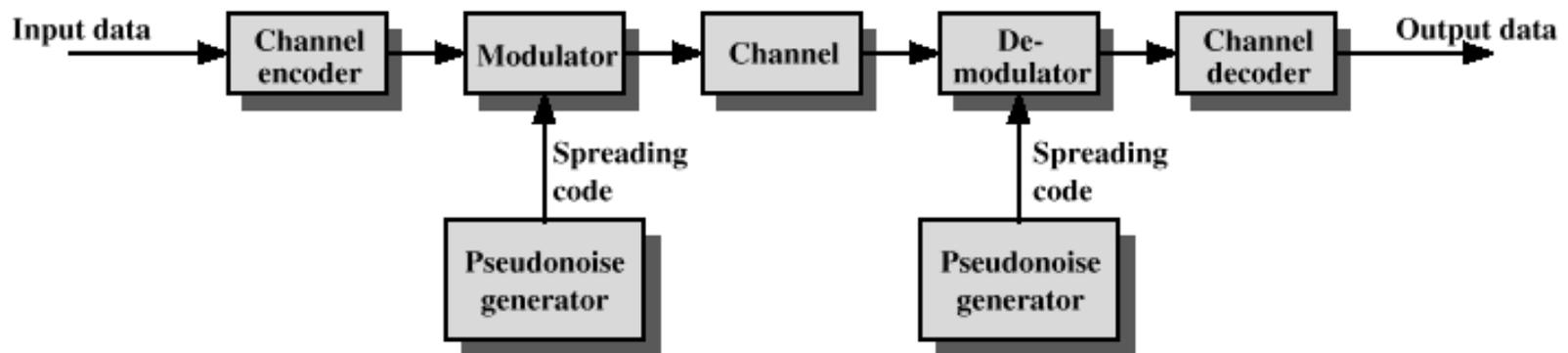
Multiplexage

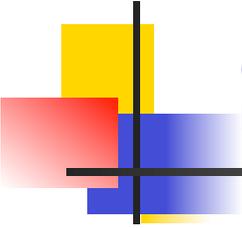
- La réalité est parfois (?) plus complexe...



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, ...

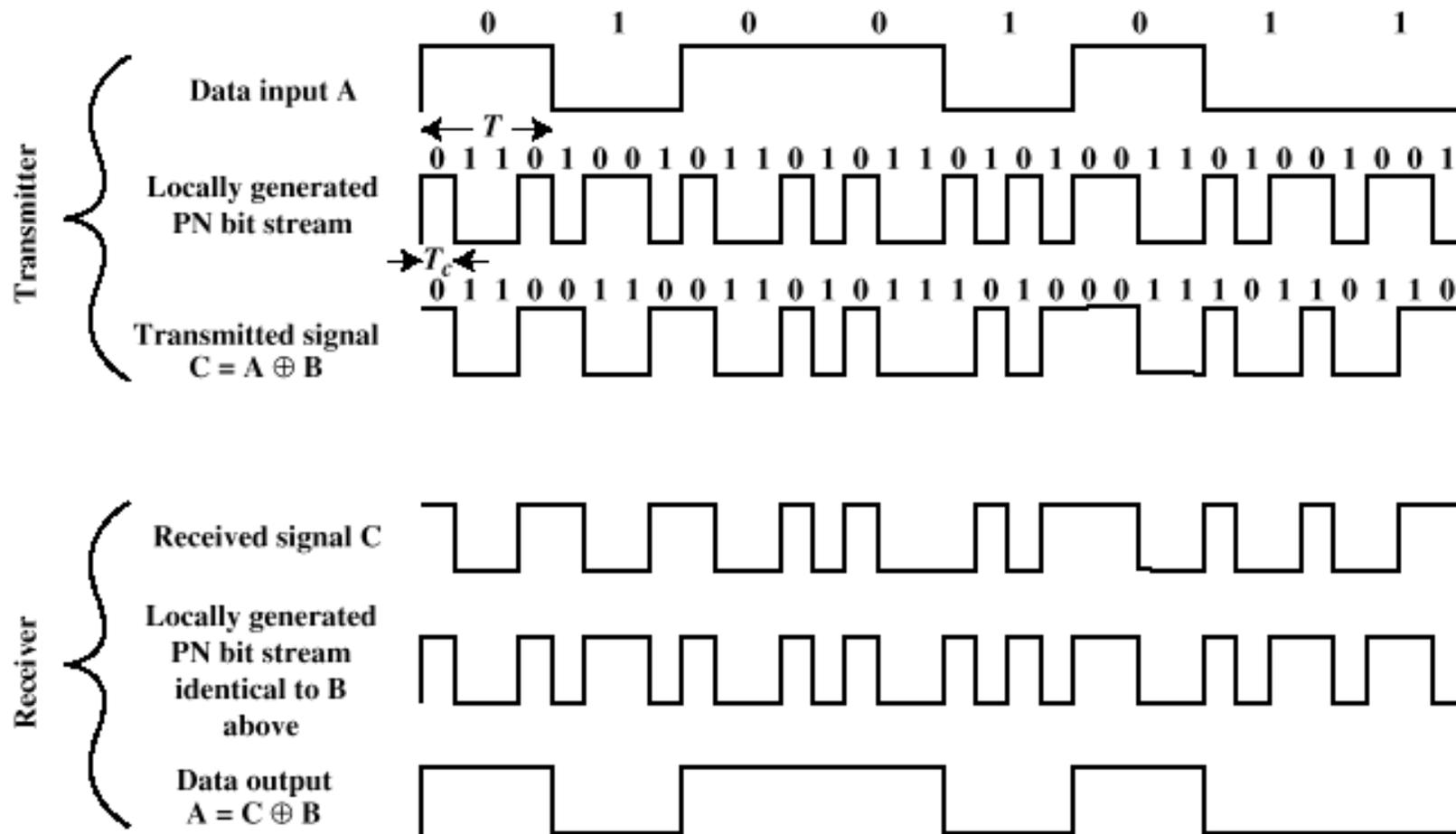


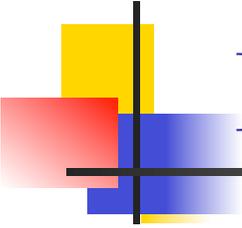


Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

- 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,

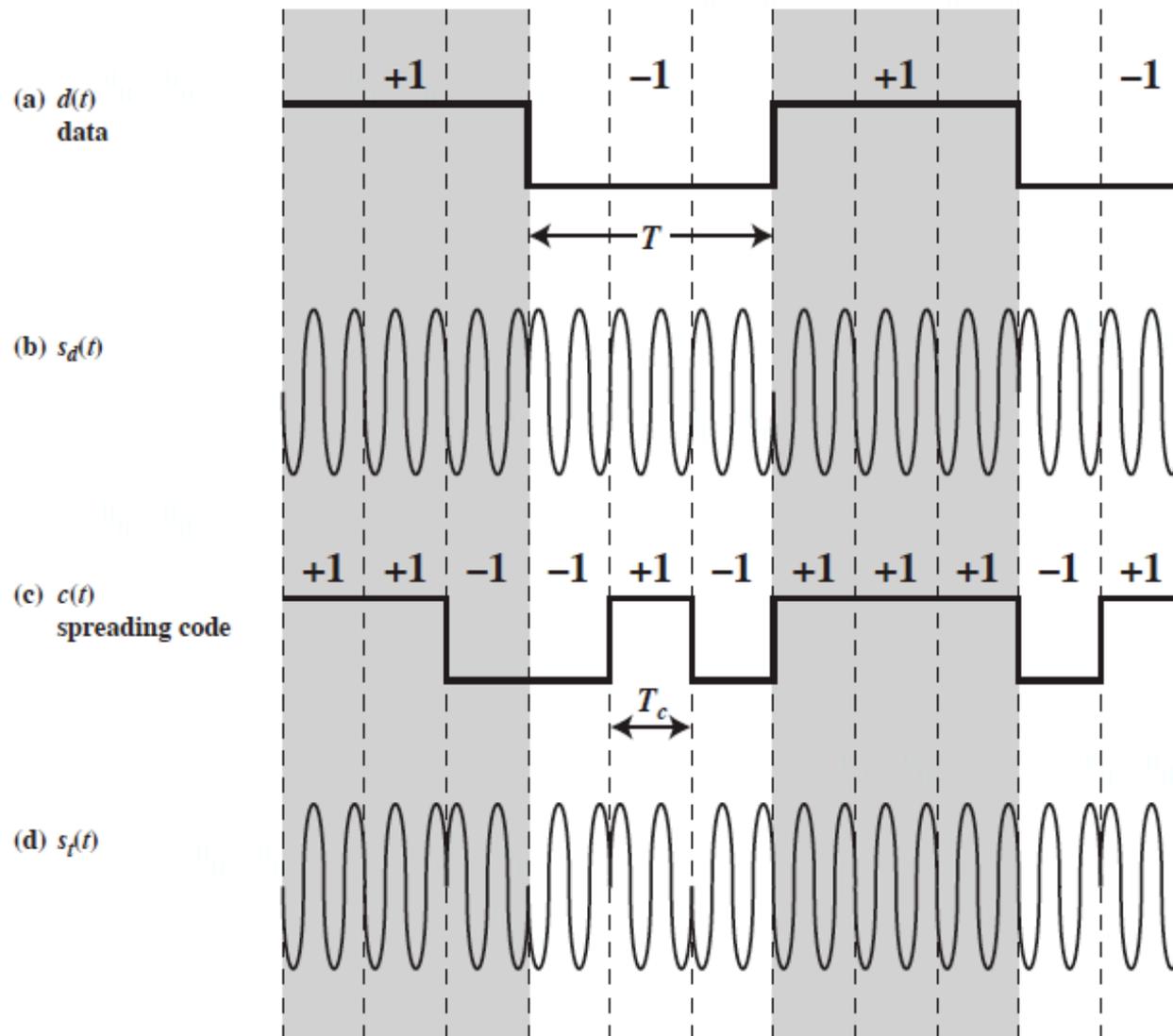
$$s_d(t) = A d(t) \cos(2\pi f_c t)$$

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

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

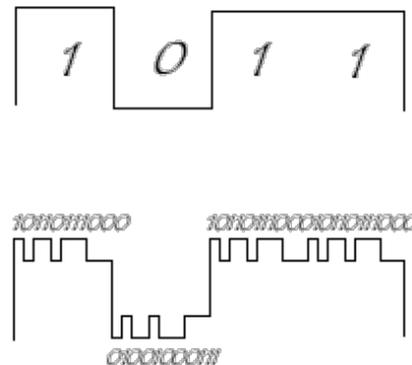
- A = amplitude of signal
 - f_c = carrier frequency
 - $d(t)$ = discrete function [+1, -1]
- At receiver, incoming signal multiplied by $c(t)$
 - Since, $c(t) \times c(t) = 1$, incoming signal is recovered

DSSS Using BPSK (2)

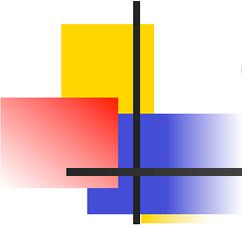


Direct Sequence Spread Spectrum in 802.11

- 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*.

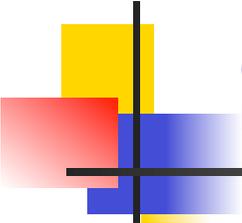


- **Redondance=contrôle d'erreurs et possibilité de correction**



Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

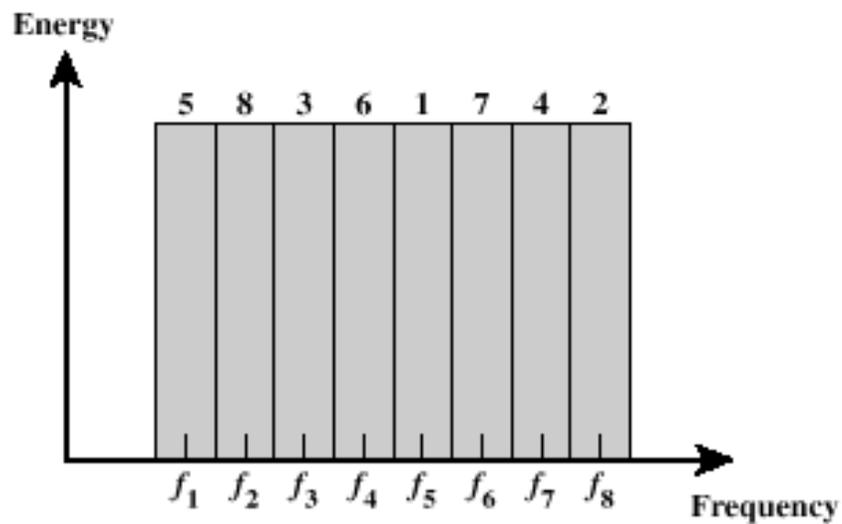
- Signal is broadcast over seemingly random series of radio frequencies
 - A number of channels allocated for the FH signal
 - Width of each channel corresponds to bandwidth of input signal
- Signal hops from frequency to frequency at fixed intervals
 - Transmitter operates in one channel at a time
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



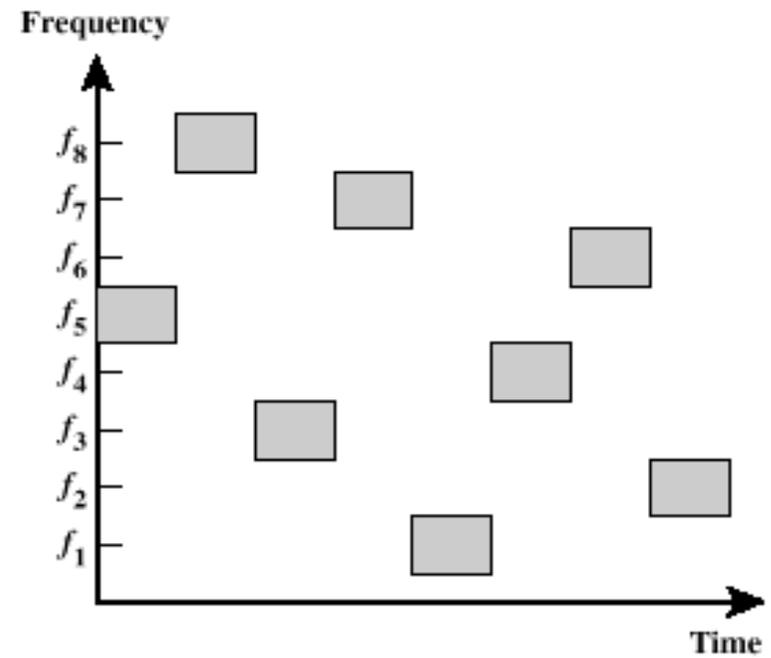
Frequency Hopping Spread Spectrum

- 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 Hopping Spread Spectrum

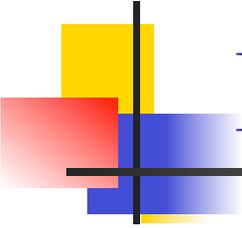


(a) Channel assignment



(b) Channel use

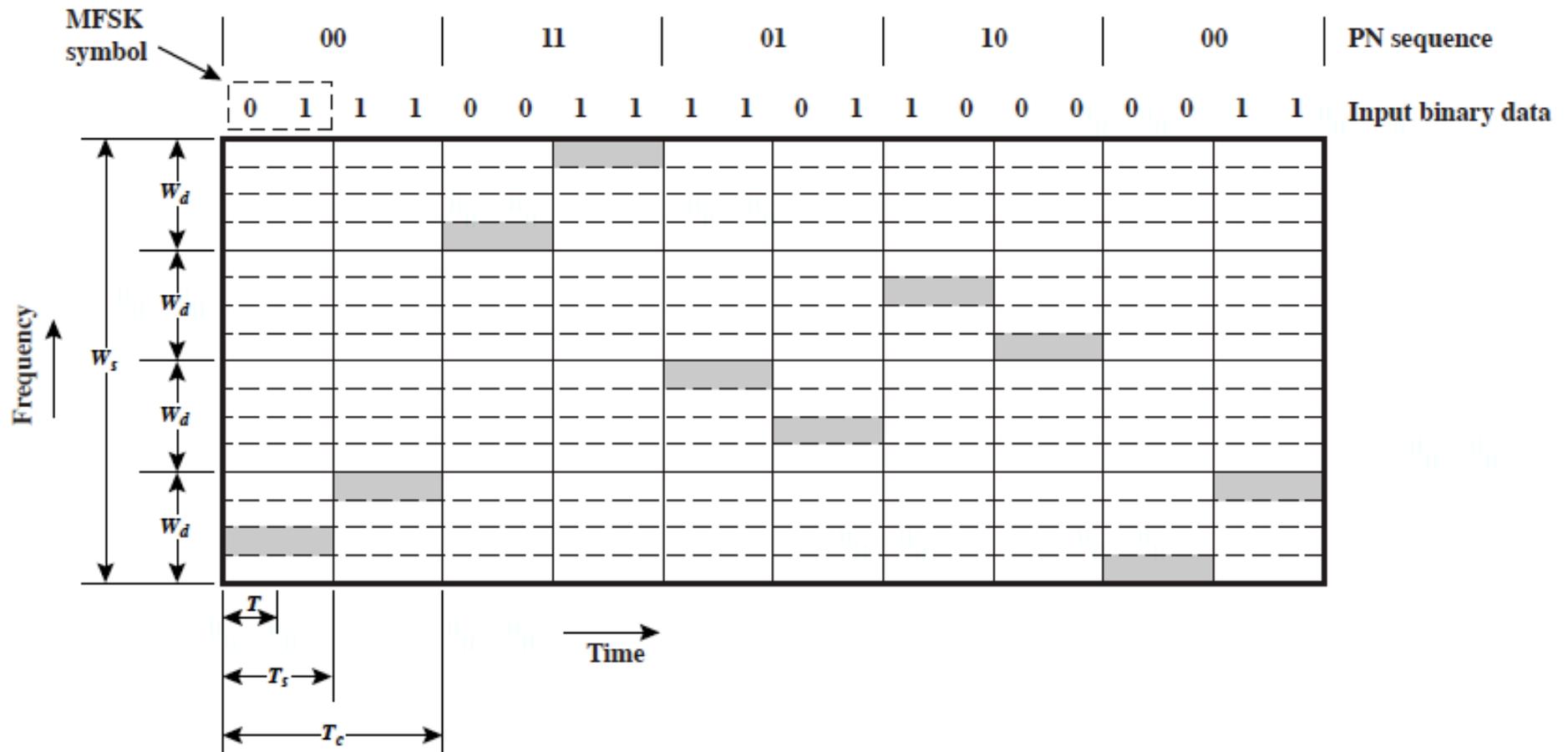
Figure 7.2 Frequency Hopping Example



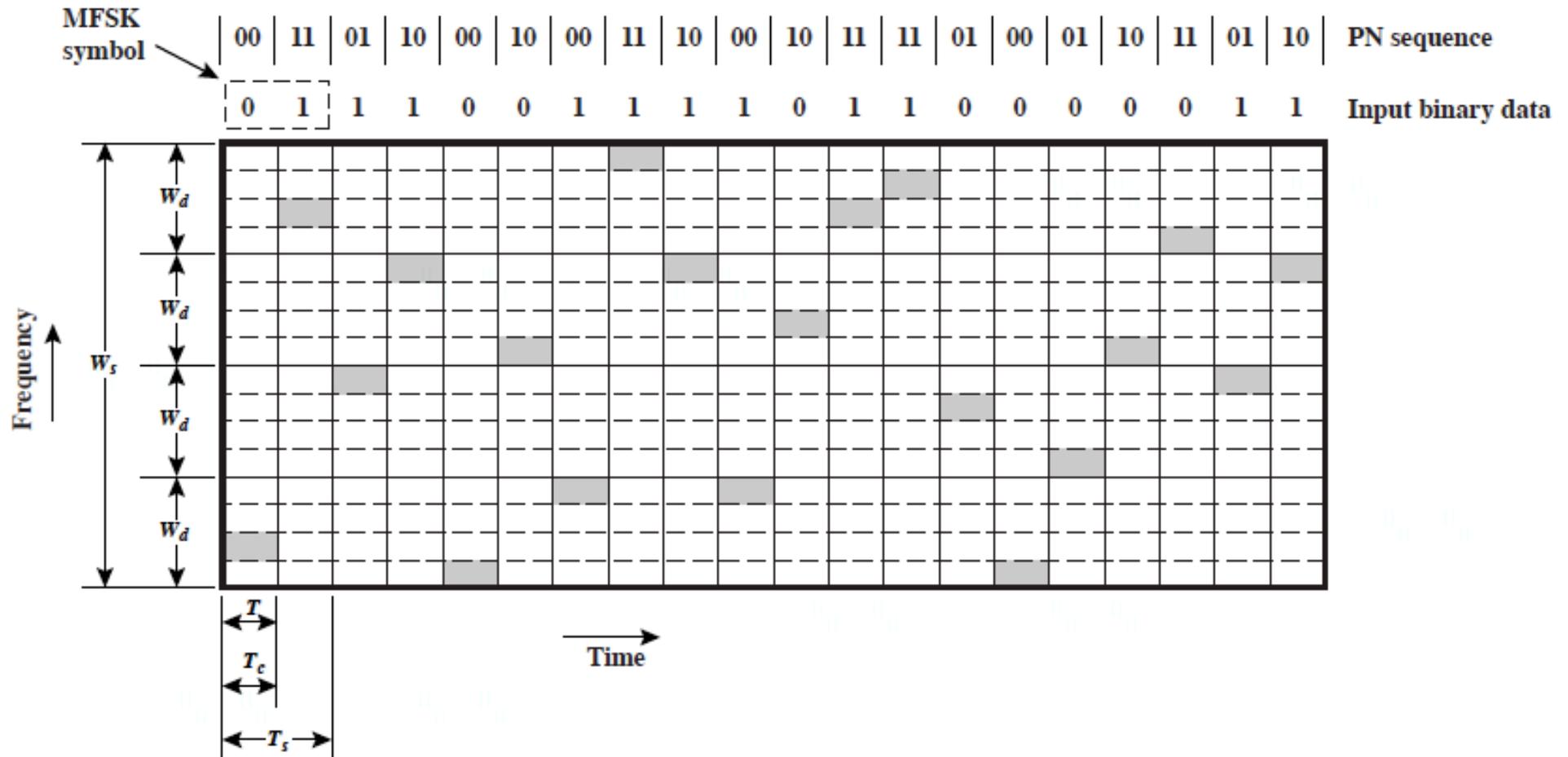
FHSS Using MFSK (1)

- 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

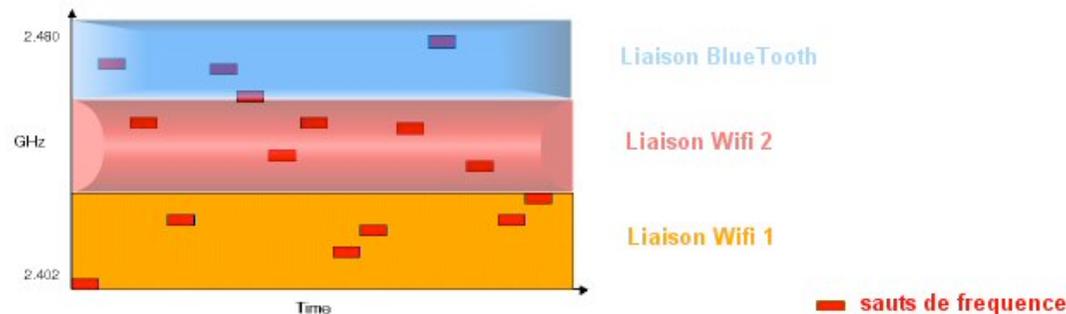


FHSS Using MFSK, fast



FHSS dans 802.11

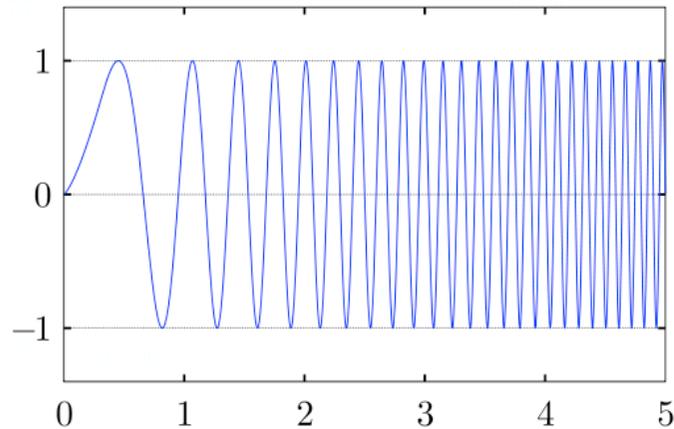
- La séquence de fréquences utilisées est connue de tous donc ne sert plus à la sécurisation des échanges.
- La bande de fréquence 2.4 - 2.4835 GHz permet de créer 79 canaux de 1 MHz. La transmission passe d'un canal à un autre pendant une courte période de temps d'environ 400 ms.
- Réduit les interférences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



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

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

Adaptive modulation

