

Réseaux émergents sans fil

Master Technologies de l'Internet

C. Pham

Université de Pau et des Pays de l'Adour

Département Informatique

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

Congduc.Pham@univ-pau.fr



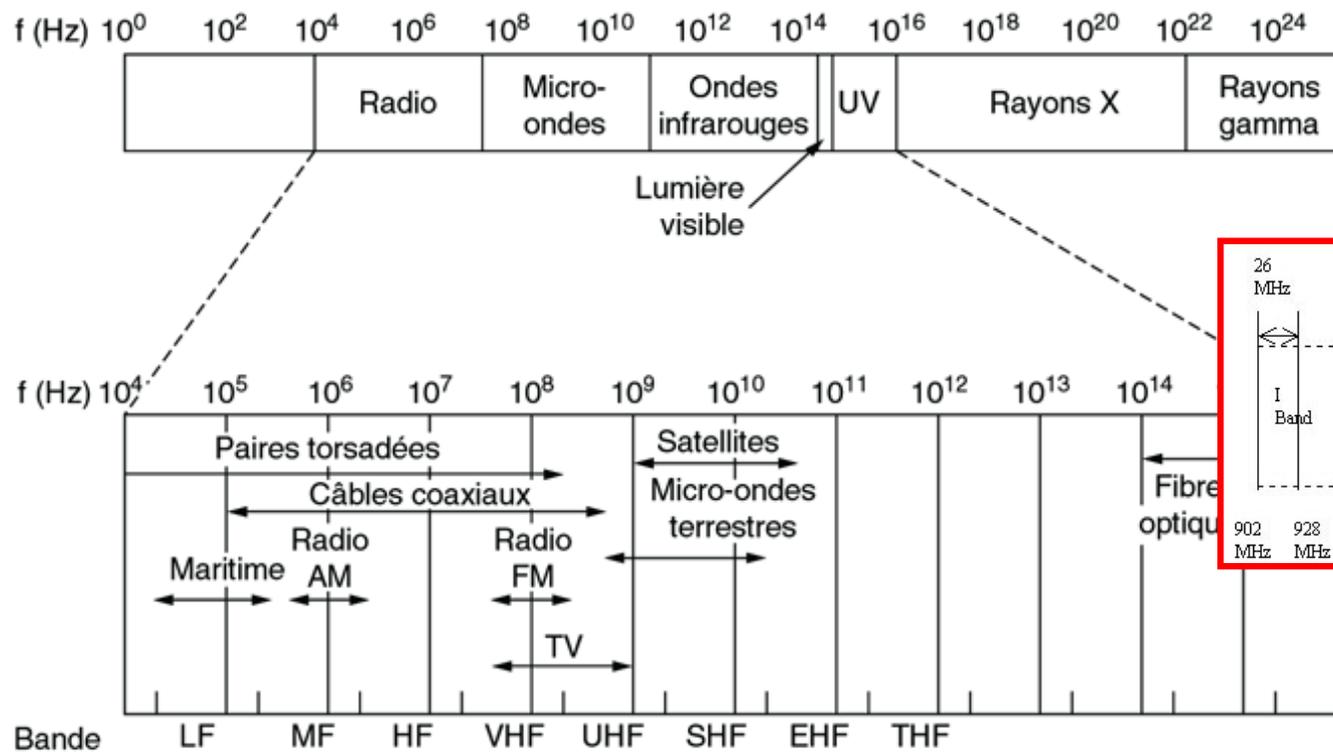
Introduction

voir

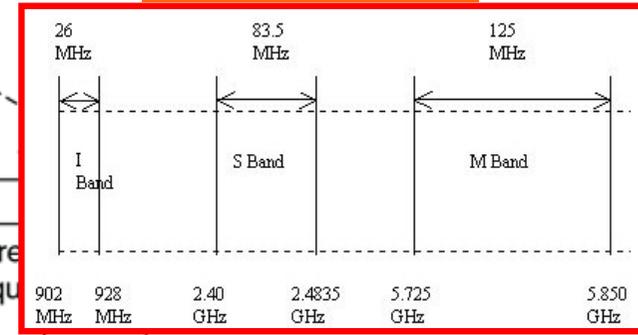
F-IOT-2a

<https://cpham.perso.univ-pau.fr/LORA/HUBIQUITOUS/solution-lab/arduino-lora-tutorial/iot-courses/F-IOT-2a.pdf>

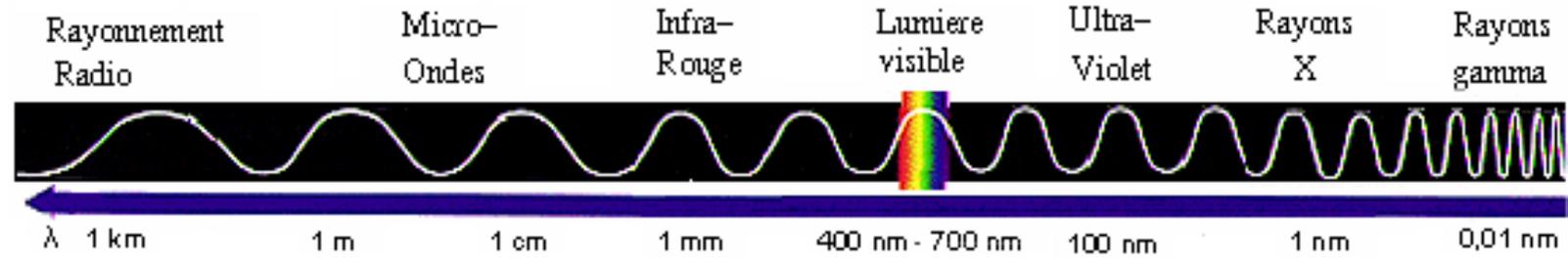
Le spectre électromagnétique



Les bandes ISM



© Pearson Education France



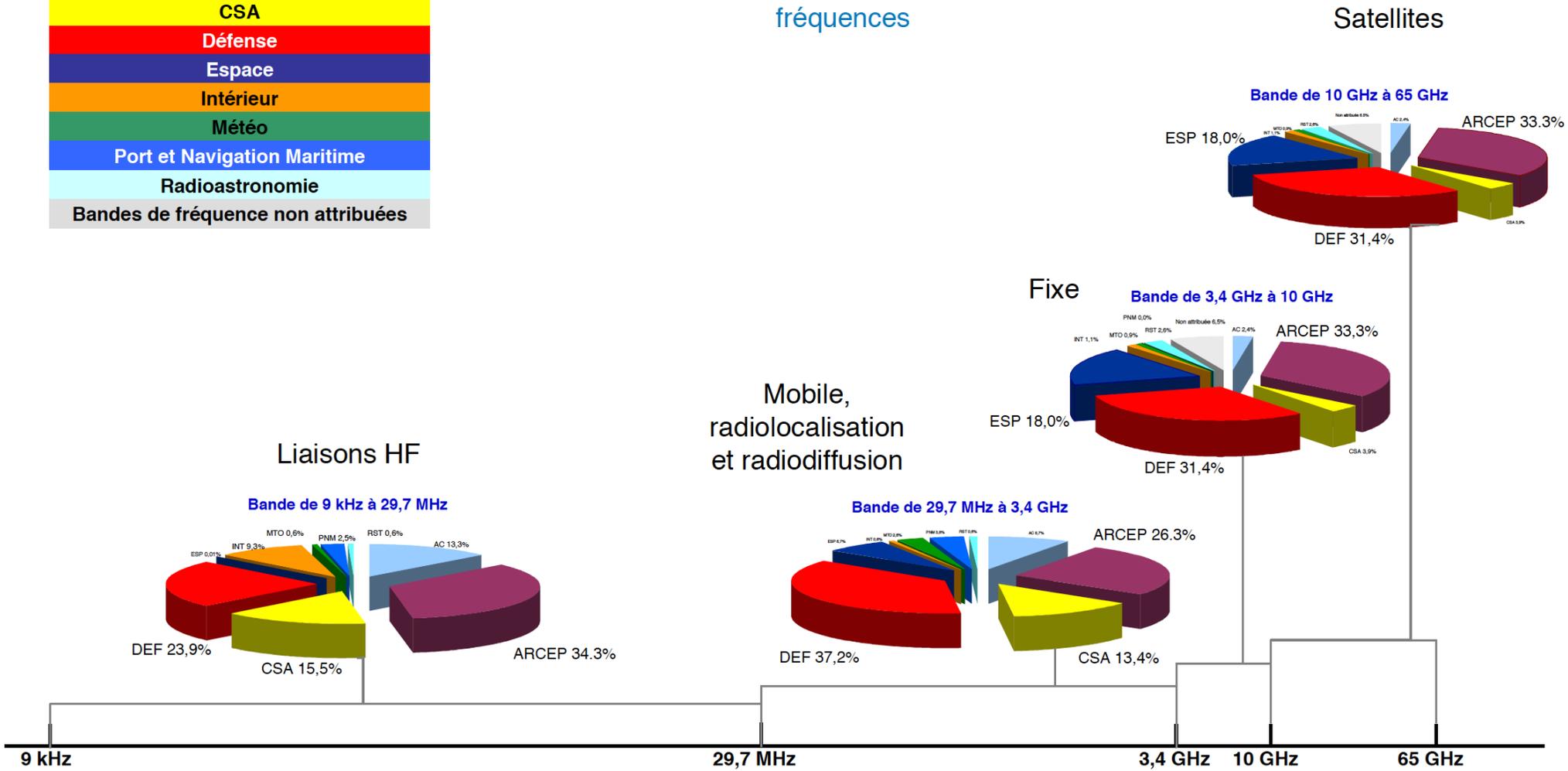
Agence nationale des fréquences (www.afnr.fr)

- **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

Aviation Civile
ARCEP
CSA
Défense
Espace
Intérieur
Météo
Port et Navigation Maritime
Radioastronomie
Bandes de fréquence non attribuées

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



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

Borne d'extension

- Mélange Point d'accès (gère une cellule) + pont radio
- **Pas de connexion au réseau filaire (\neq point d'accès)**
- Agrandit la zone de couverture sans ajout de câble
- Gère le trafic de sa cellule comme les points d'accès
- Possibilité d'en utiliser plusieurs pour atteindre les mobiles les + éloignés.

Pont radio

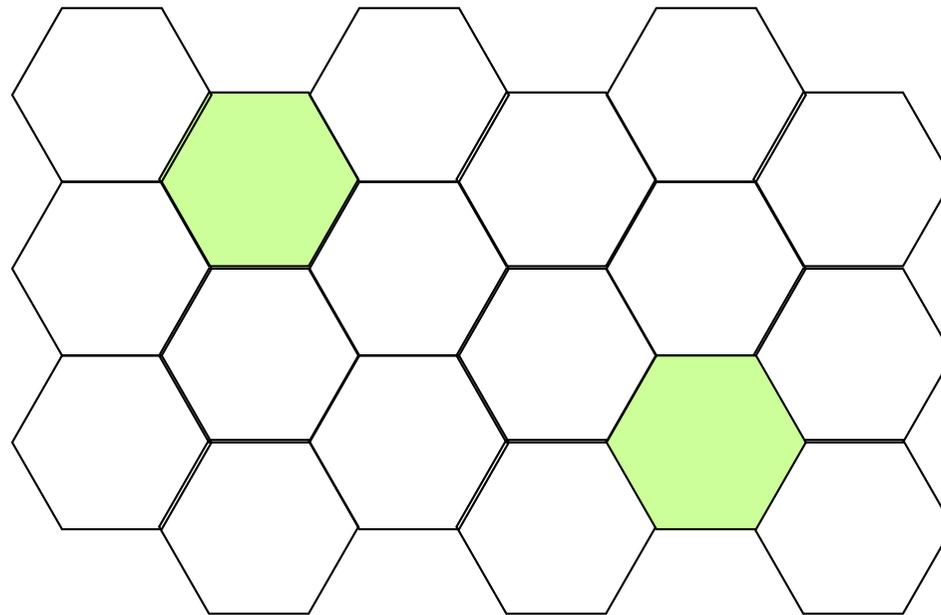
- Lien entre 2 réseaux câblés
de 100 m jusqu'à quelques kms
- Se connecte à un réseau et non à une station
- Ne gère pas de cellule de communication

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 \Leftrightarrow plusieurs AP (Access Point)

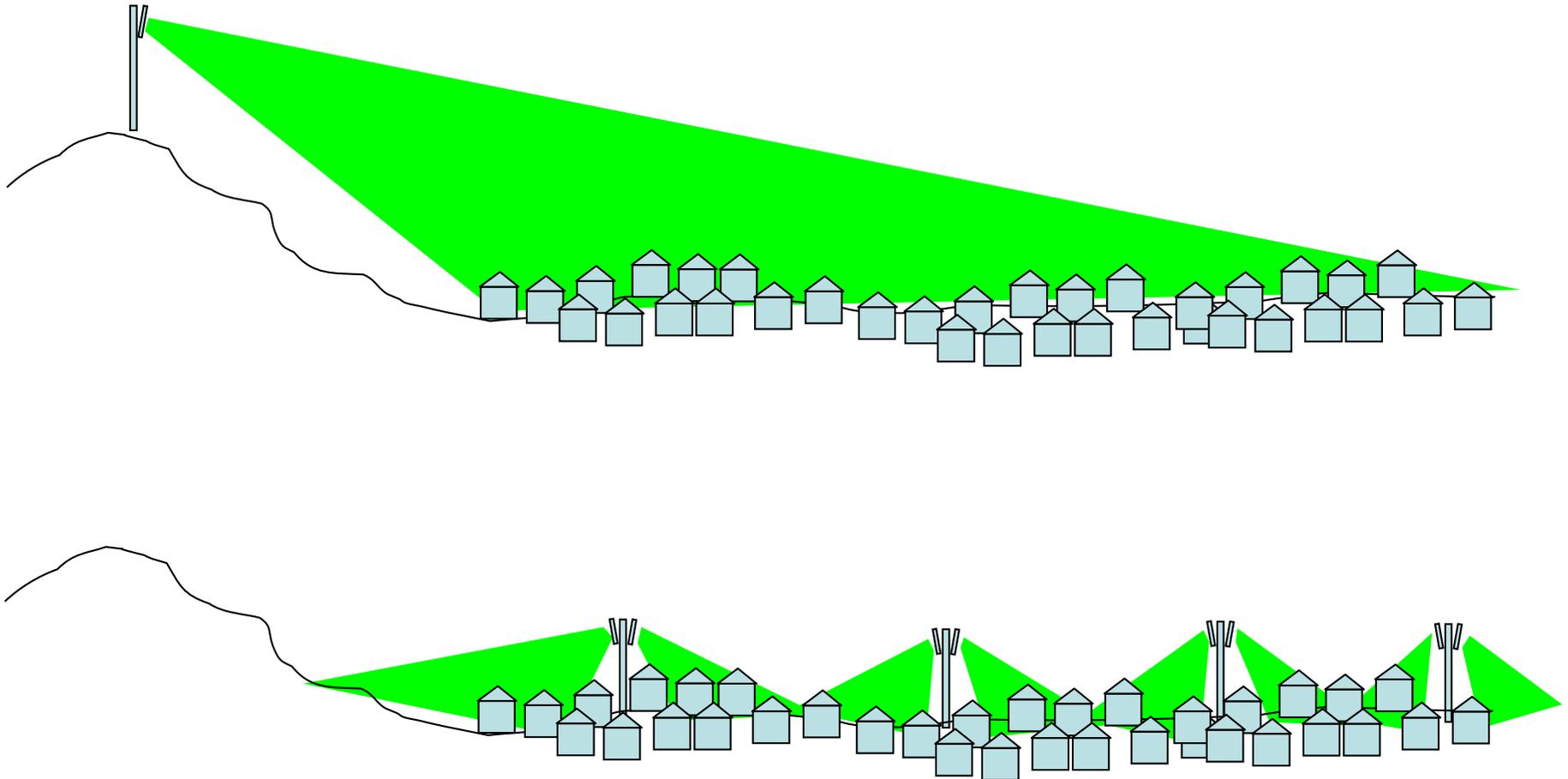
Organisation cellulaire

- Réutilisation de la même fréquence sur des zones géographiques différentes



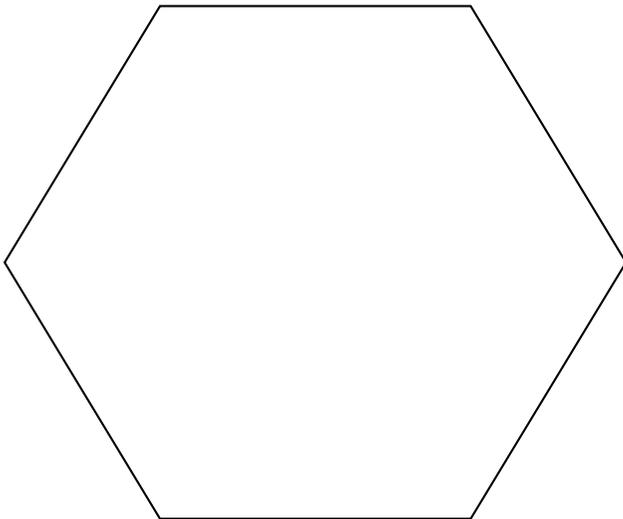
- Avantage : augmentation de la capacité
- Inconvénient : augmentation des interférences

Implantation des antennes



Exemple : couverture d'une zone

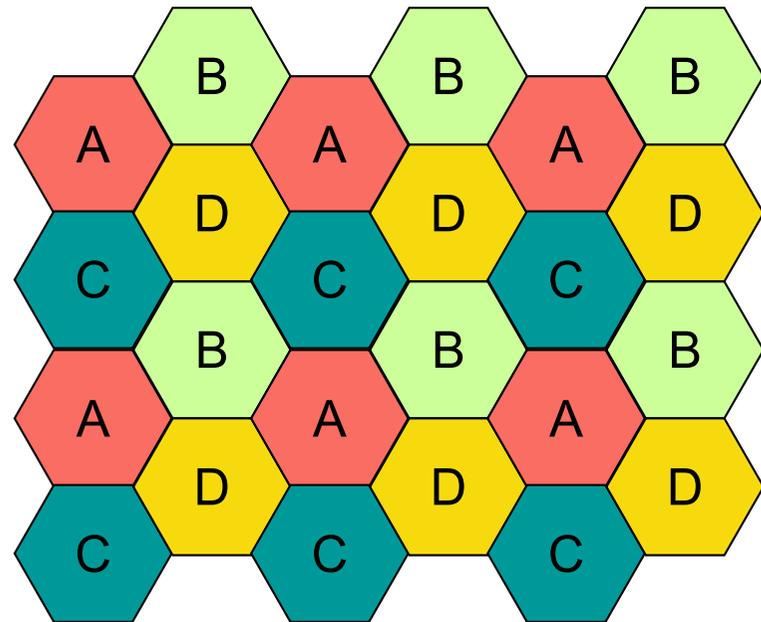
1 cellule



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

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

Organisation
en 6 clusters de 4 cellules



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

Gain = nombre de clusters

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.

Organisation cellulaire

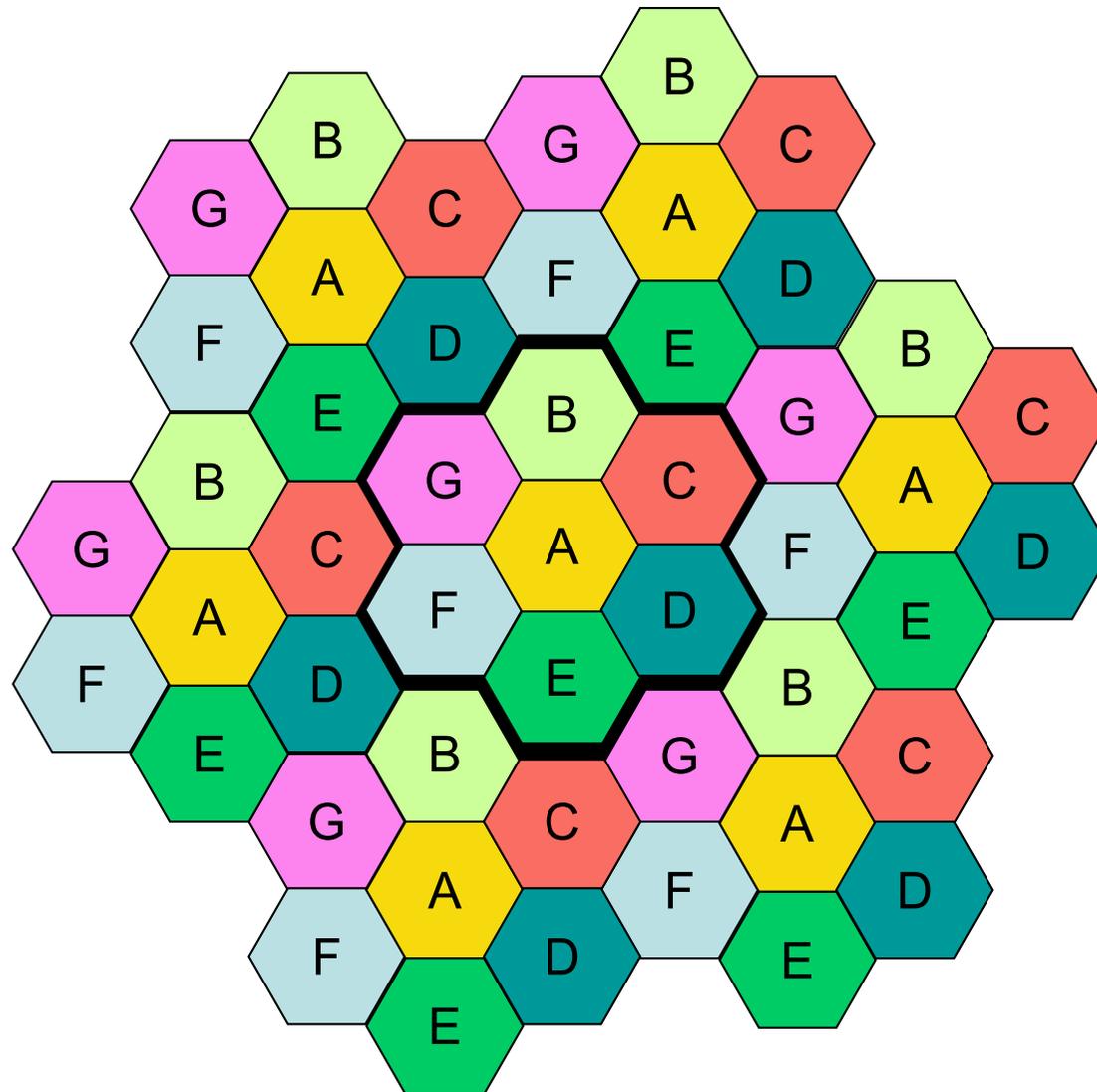
- Facteur de réutilisation

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N}$$

avec :

- D = distance entre cellules
- R = rayon de la cellule
- N = taille du cluster

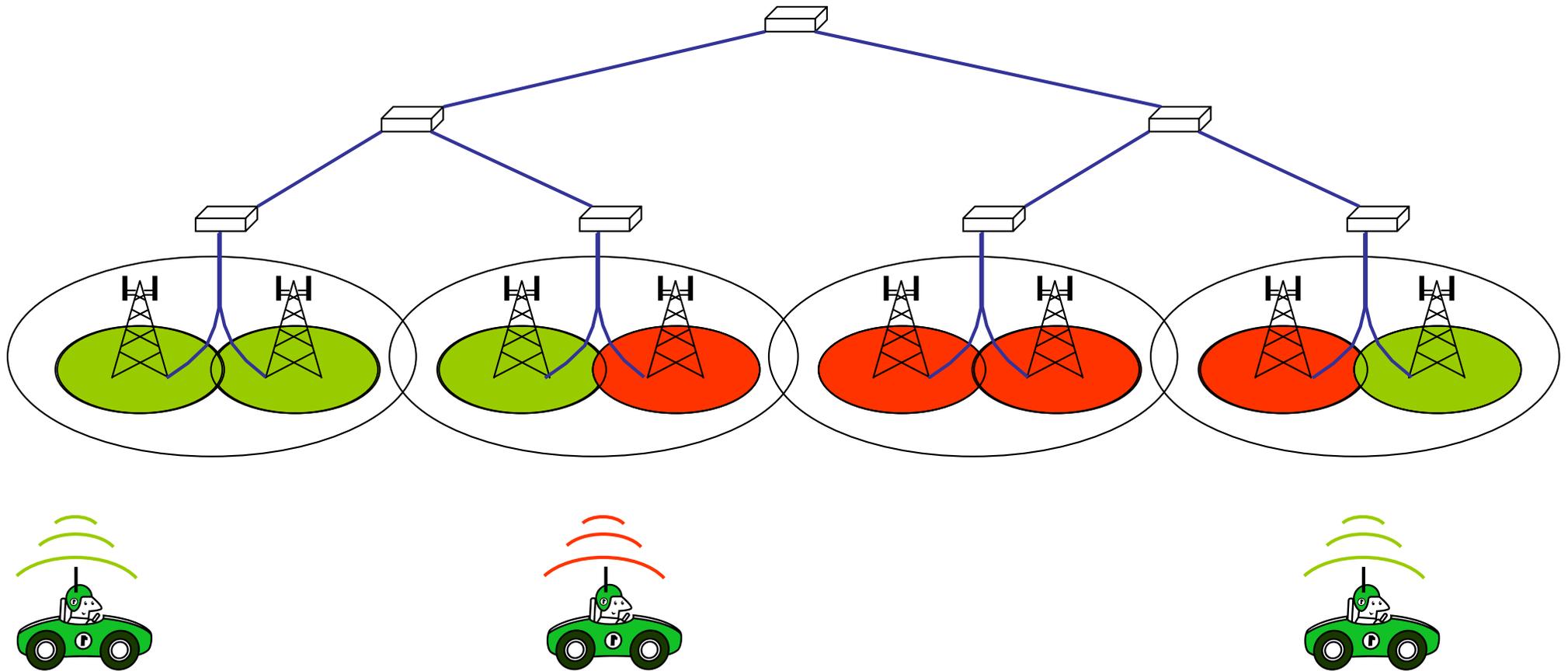
Exemple en zone urbaine, N=7



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"

- le handover est tenté de plus en plus souvent :
 - réduction de la taille des cellules dans les systèmes 2G (numériques)
(de plus en plus pour le milieu urbain = forte densité de population)
 - optimisation du trafic
- Contraintes :
 - obtenir des mesures précises de qualité
 - faire le bon choix pour le changement de cellule
 - réaliser rapidement le handover

Mécanisme de "Handover" : 3 phases

1. Mesures de qualité et de supervision du lien actif

- puissance du signal reçu
(RSSI : Received Signal Level Indicator).
- le taux d'erreur binaire (BER : Bit Error Rate).
- ratio C/I (Carrier/Interference)
- distance entre le mobile et la station de base.

Ex: GSM entre 3 et 10 mesures toutes les 0,5s

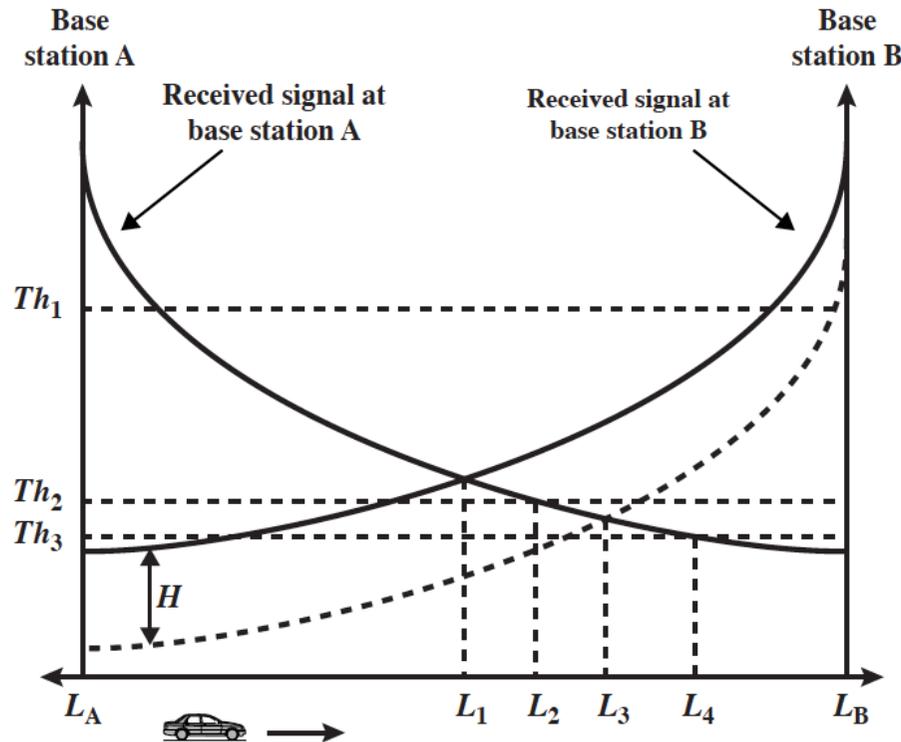
Mécanisme de "Handover"

2. Choix de la cellule cible

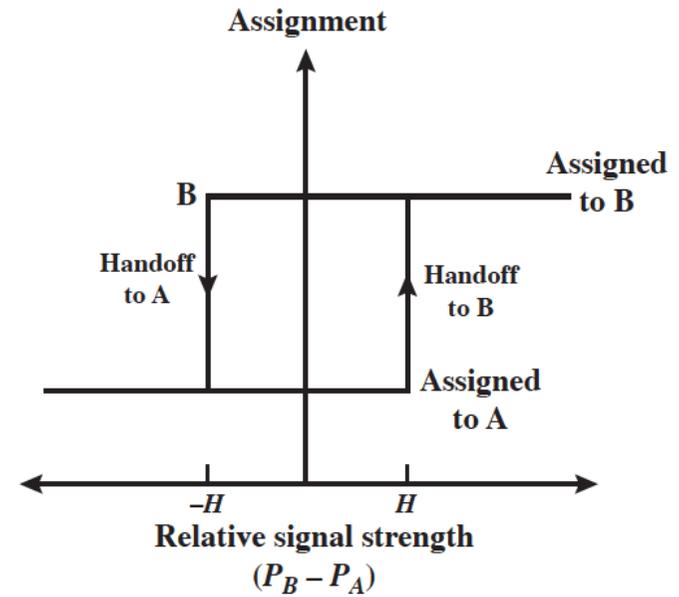
le mobile gère une liste de candidates (5 maxi en GSM) si il reçoit un signal suffisant pour le canal pilote

- puissance relative des signaux ($P_2 > P_1$)
- puissance relative des signaux avec seuil ($P_1 < \text{seuil}$ et $P_2 > P_1$)
- puissance relative des signaux avec hystérésis ($P_2 > P_1 + \text{seuil}$)
- puissance relative des signaux avec seuil et hystérésis ($P_1 < \text{seuil}_1$ et $P_2 > P_1 + \text{seuil}_2$)

Hysteresis-based selection



(a) Handoff decision as a function of handoff scheme

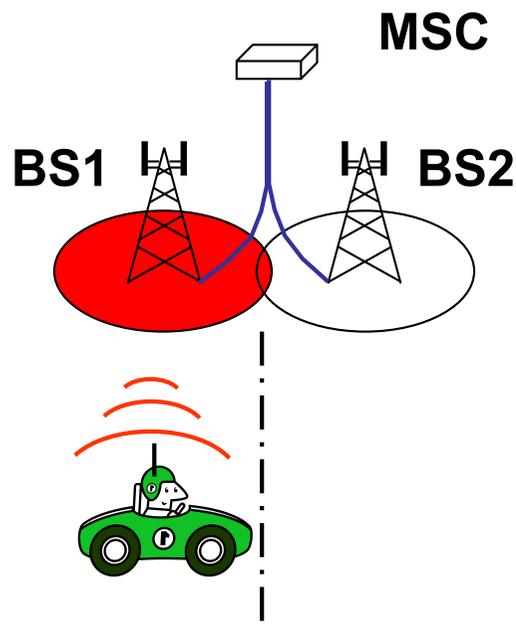


(b) Hysteresis mechanism

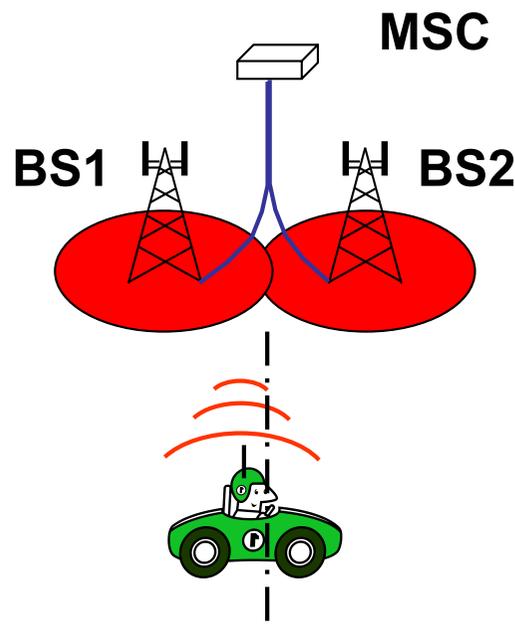
Mécanisme de "Handover"

- Handover doux (soft-handover)

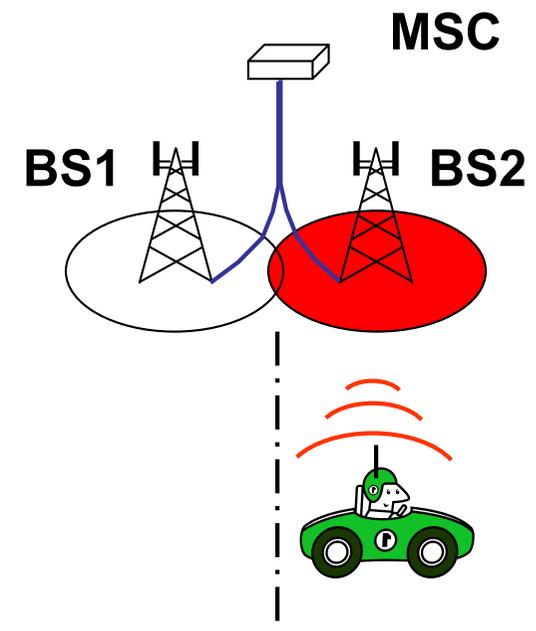
Avant



Pendant



Après

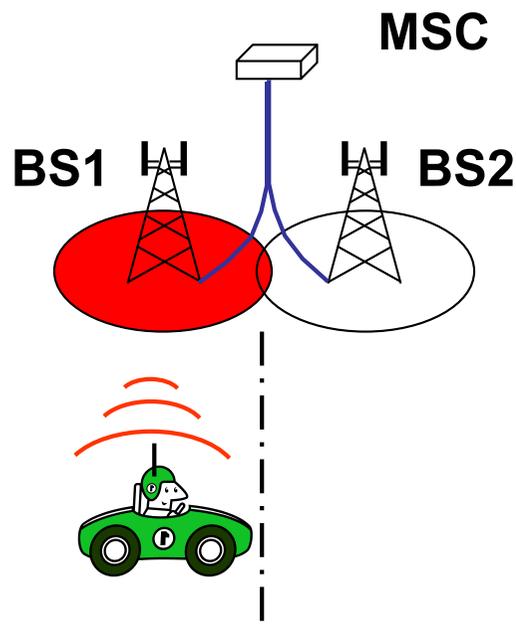


- Plus de consommation de ressources
- + Meilleur confort lors de passage d'une cellule à l'autre

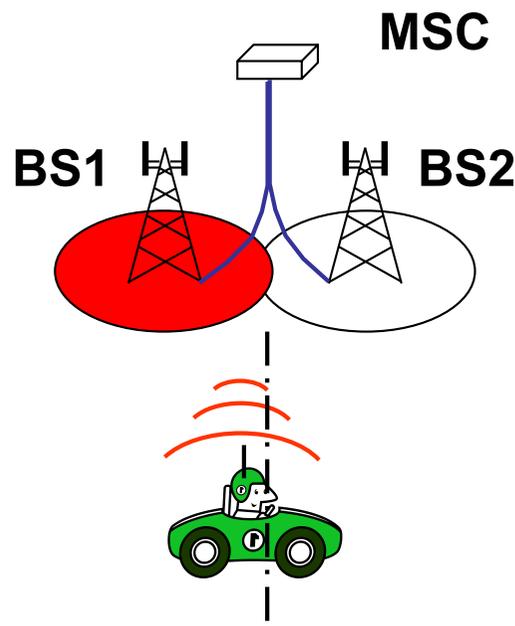
Mécanisme de "Handover"

- Handover dur (hard-handover)

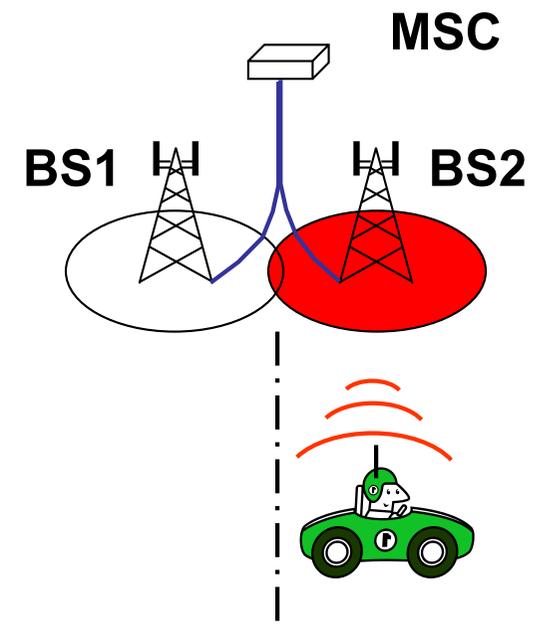
Avant



Pendant



Après



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

Mécanisme de "Sélection / Re-sélection"

- Pour un mobile **en veille**, on parle de **sélection** de la station de base.
- Un mobile :
 - écoute les message diffusés par les BS à tous les mobiles
 - est prêt à se connecter au réseau en cas d'appel
 - signale sa position régulièrement
- La mise sous tension d'un mobile implique une sélection de BS.
- Le déplacement induit une **re-sélection** régulière.
- La gestion de la localisation = roaming
- Recherche de mobile = paging dans la dernière cellule ou dans tout le réseau (inondation)

**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, 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?
- $D=R_m.\log_2V$

Débit maximum d'un canal de transmission

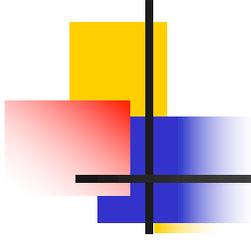
- Si un signal quelconque est appliqué à l'entrée d'un filtre passe-bas ayant une bande passante W , le signal ainsi filtré peut être reconstitué avec un échantillonnage à $2W$ Hz (Nyquist, Shannon)

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

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 ; $\text{SNR}_{\text{dB}} = 24 \text{ dB}$

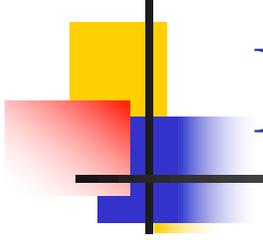
$$B = 4 \text{ MHz} - 3 \text{ MHz} = 1 \text{ MHz}$$

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

$$\text{SNR} = 251$$

- 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?

$$C = 2B \log_2 M$$

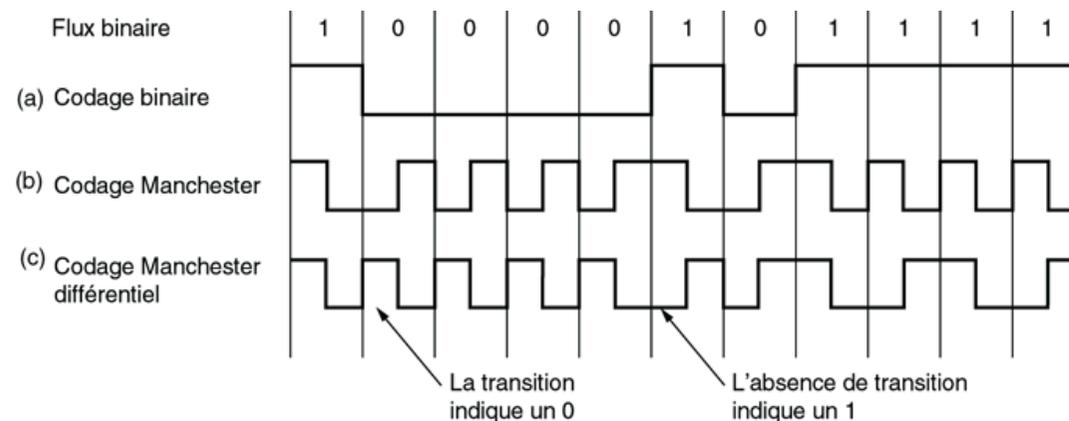
$$8 \times 10^6 = 2 \times (10^6) \times \log_2 M$$

$$4 = \log_2 M$$

$$M = 16$$

Transmission en bande de base

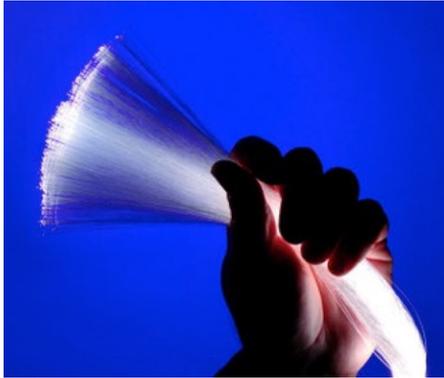
- En bande de base, les 0 et les 1 binaires sont directement représentés par des valeurs de tensions. L'avantage est la simplicité, mais les distances sont limitées à quelques kilomètres.
 - **NRZ**: les 1 sont codés par une tension positive, les 0 par l'opposé. Pas d'horloge véhiculée, problème de synchronisation.
 - **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.



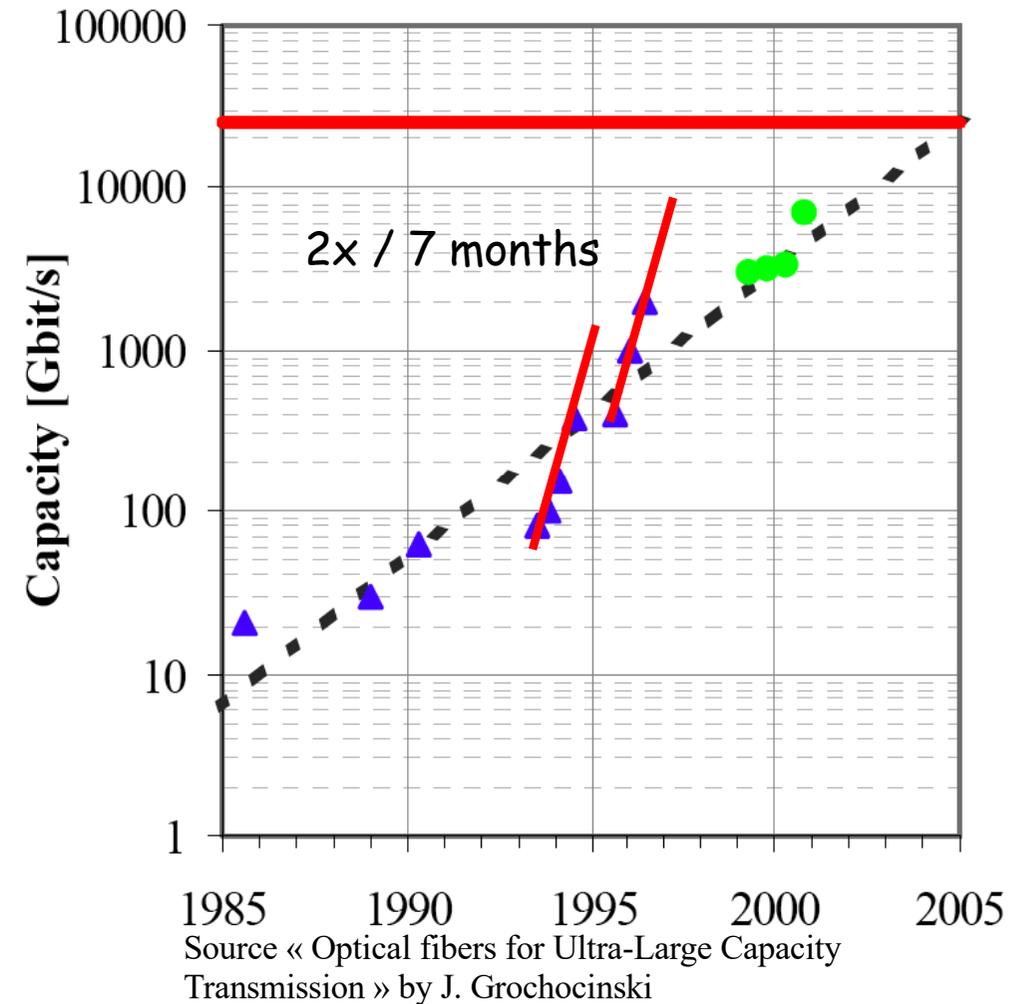
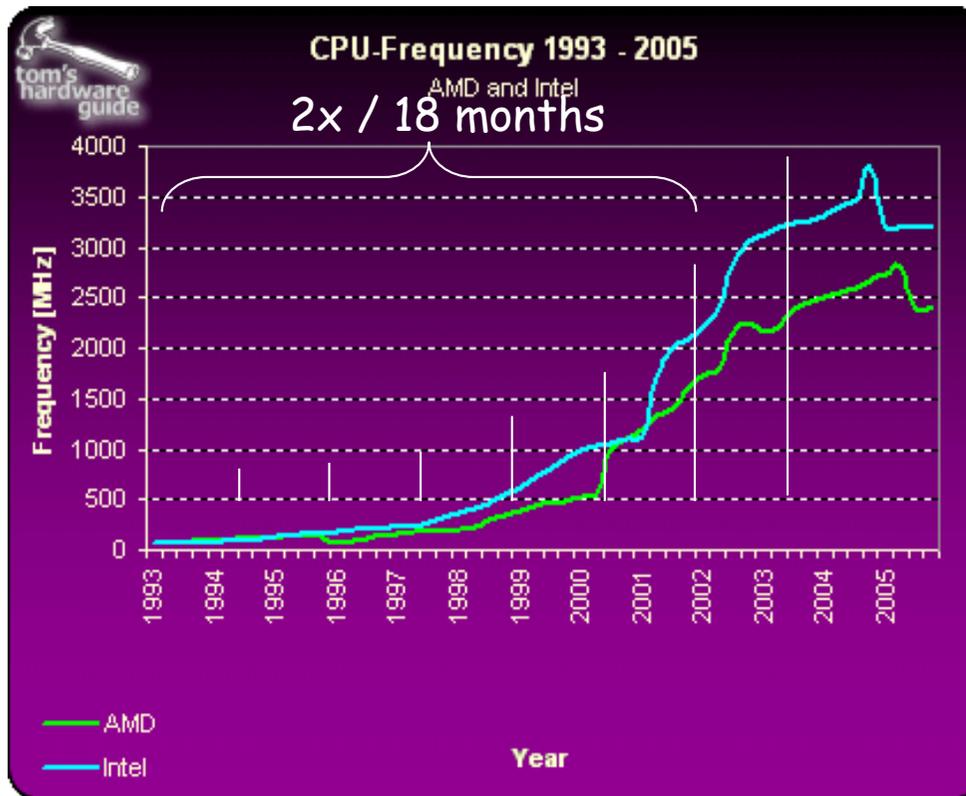
© Pearson Education France

Les difficultés en transmission sans-fil

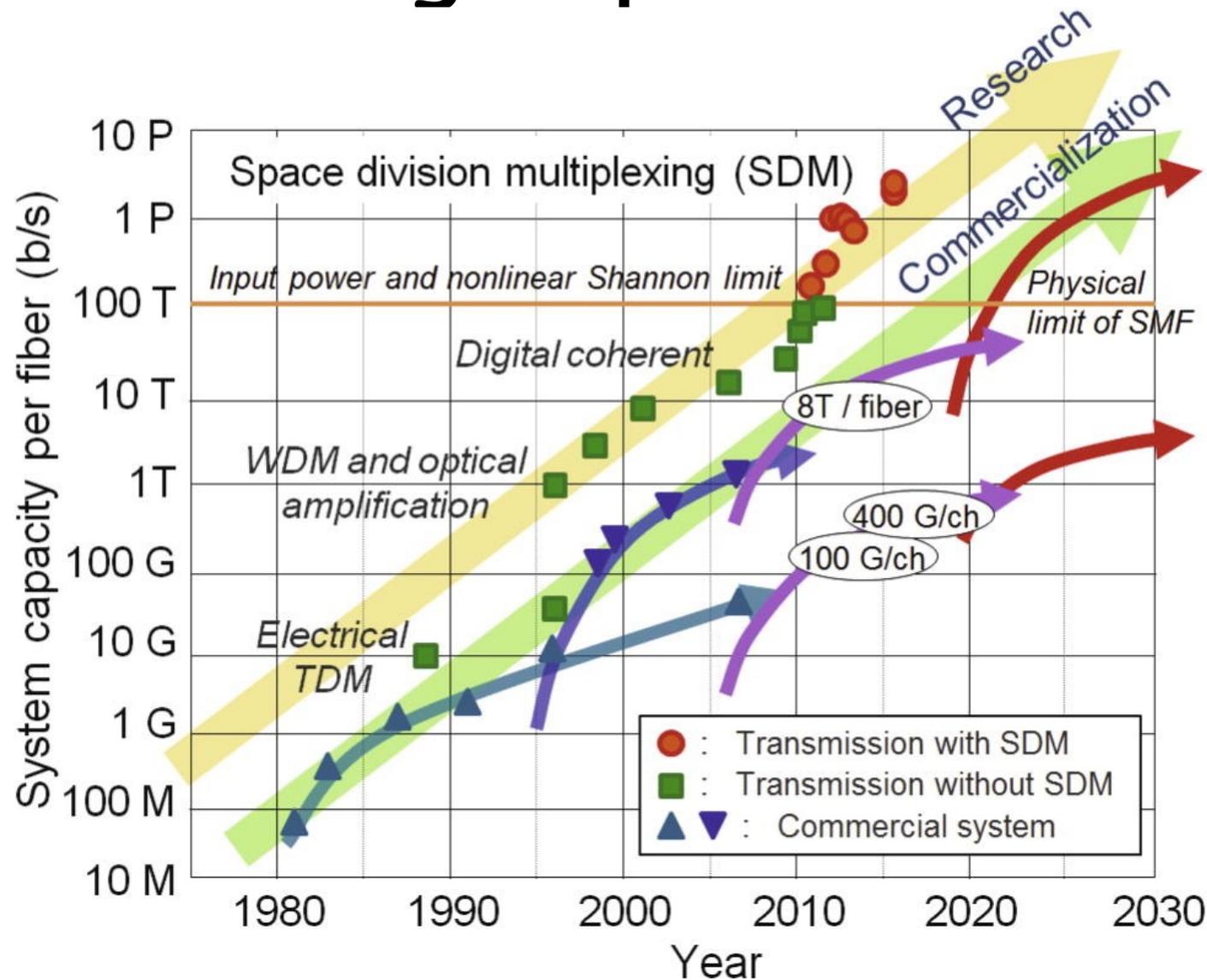
- **Codage bande de base pas possible**
- **La puissance de transmission doit nécessairement être plus limitée**
- **Plus grande taux d'erreurs**
- **Les technologies très haut débit en filaires ne sont pas ou très peu applicables car en filaire c'est essentiellement de la fibre optique**
- **Les méthodes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



1st revolution: going optical

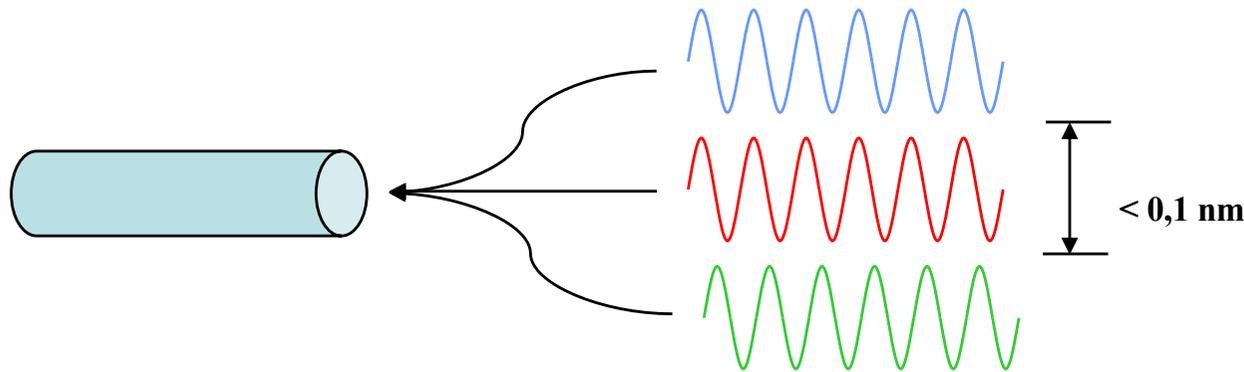


Still big improvements!



DWDM, bandwidth for free?

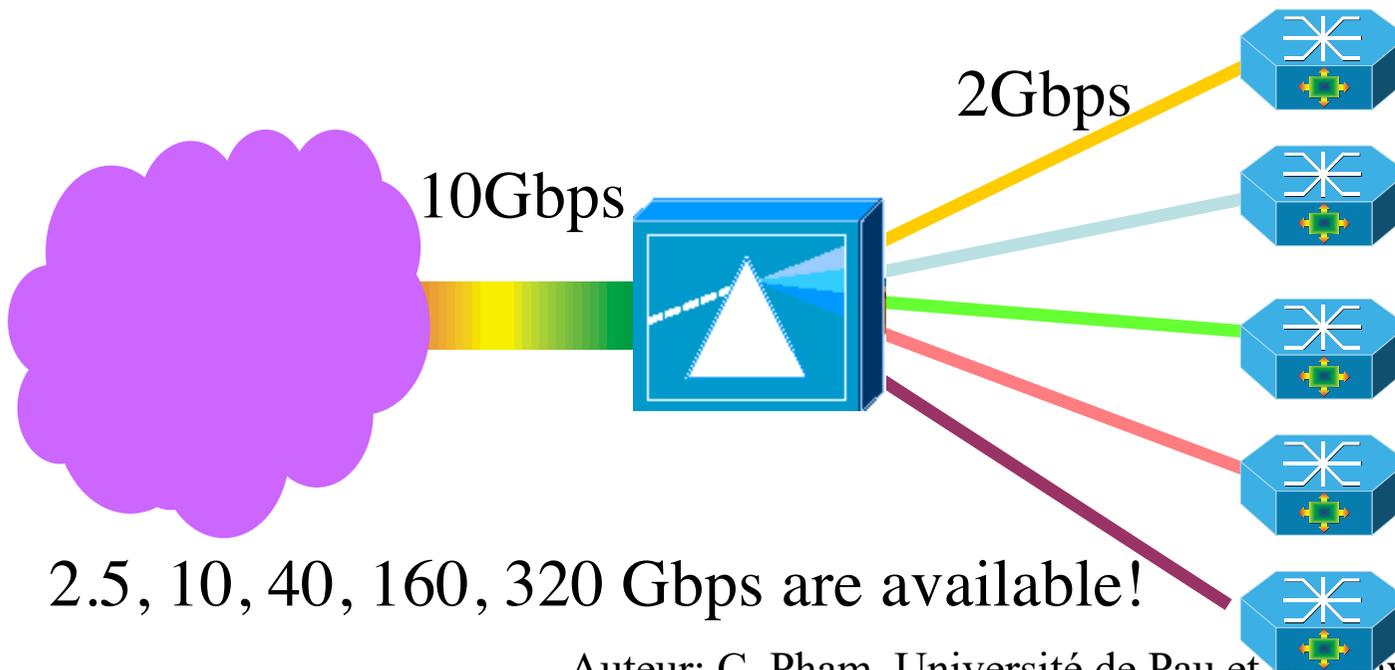
DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing



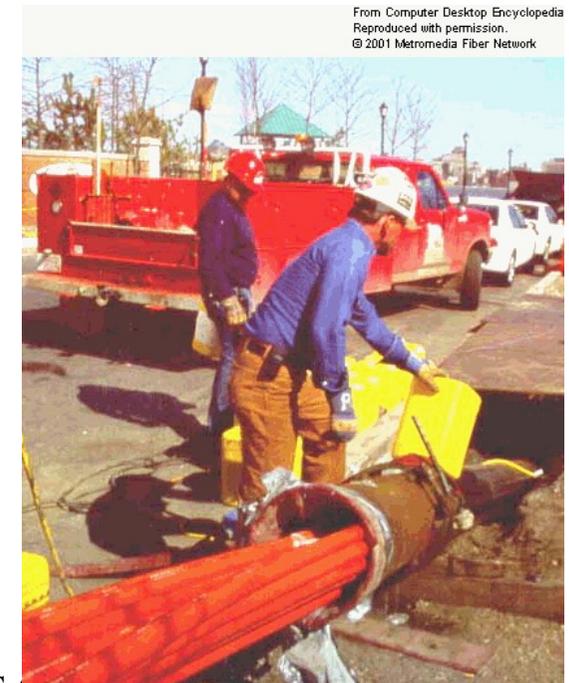
Submarine cable for deep sea areas



Submarine cable for shallow sea areas

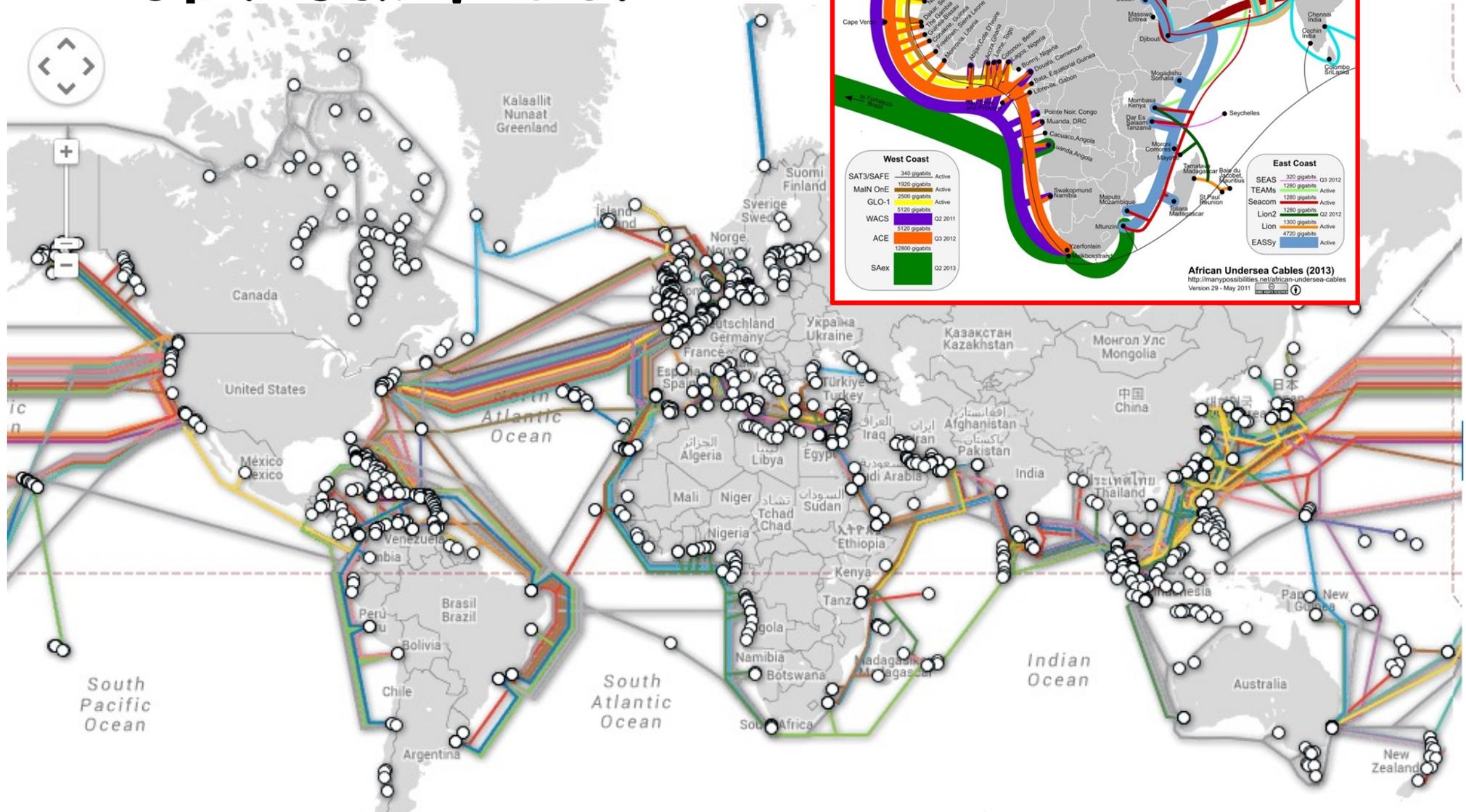


2.5, 10, 40, 160, 320 Gbps are available!

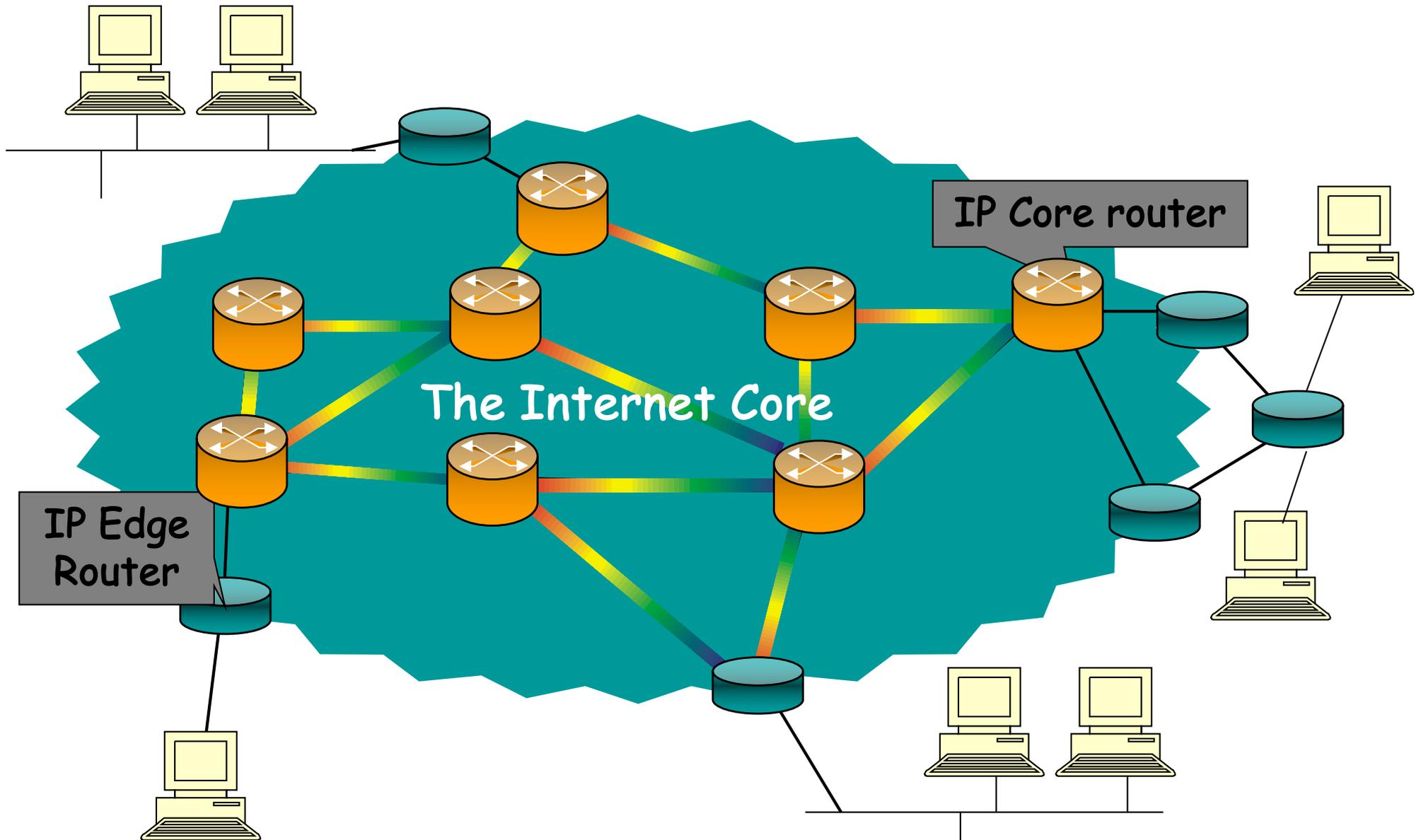


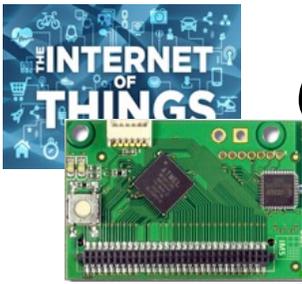
From Computer Desktop Encyclopedia
Reproduced with permission.
© 2001 Metromedia Fiber Network

Submarine optical fiber



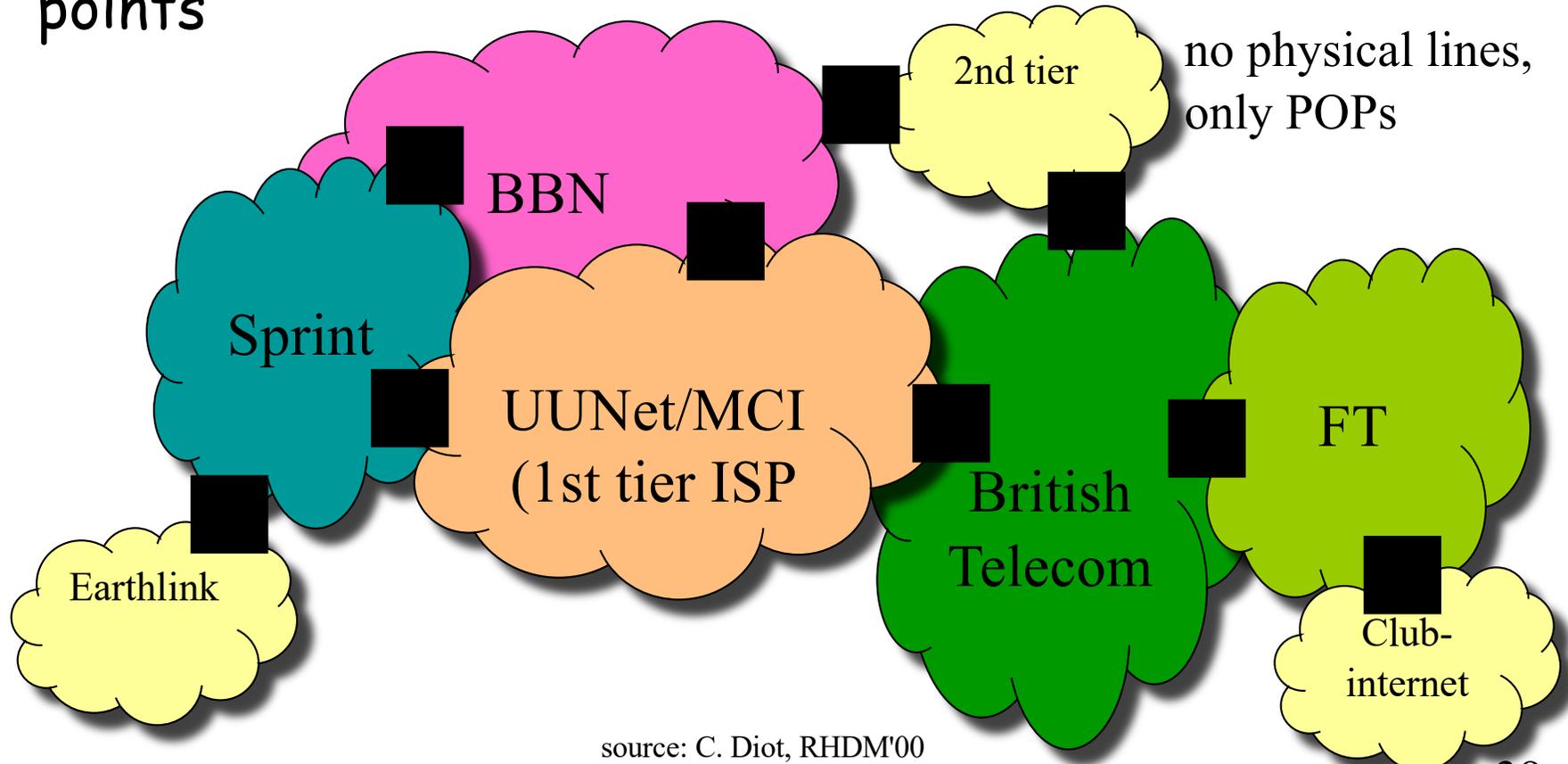
Internet core is 100% optical



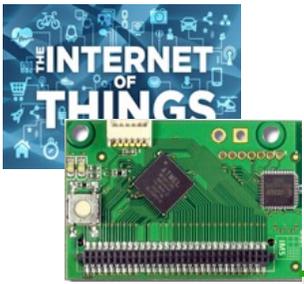


Operators and ISPs: they rule the Internet

- ❑ « 1st tier ISP » own their lines.
- ❑ Interconnections happen mostly at private peering points



source: C. Diot, RHDM'00

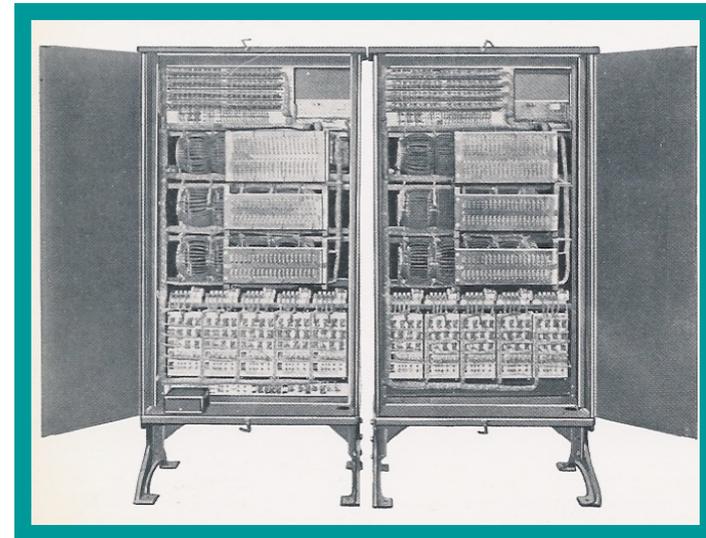


Back in time: The telephone system & network

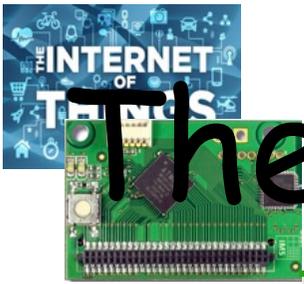


*First automatic Branch Exchange Almond
B. Strowger, 1891...*

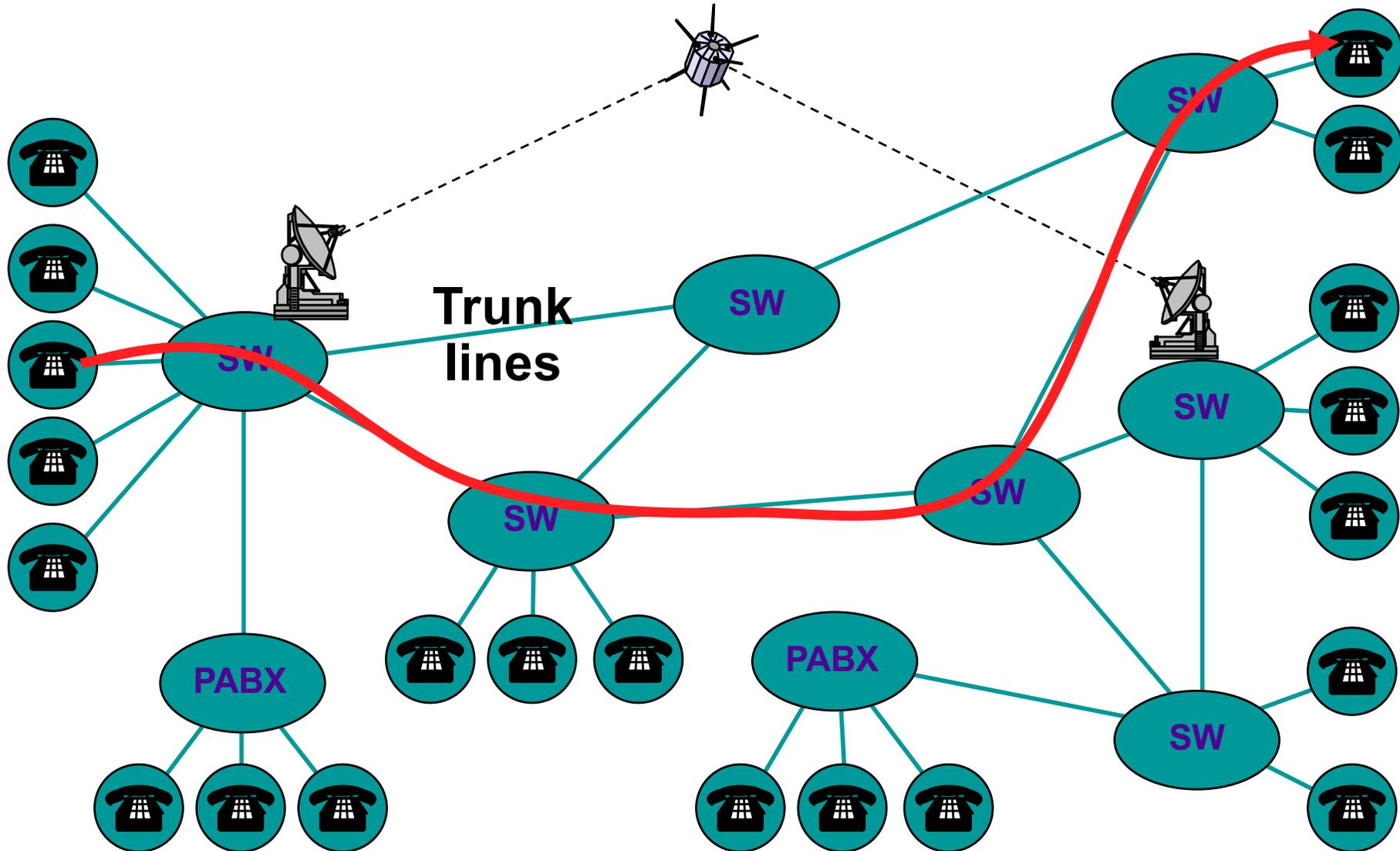
**Signaling replaces the
operator**



Source J. Tiberghien, VUB



The telephone circuit view



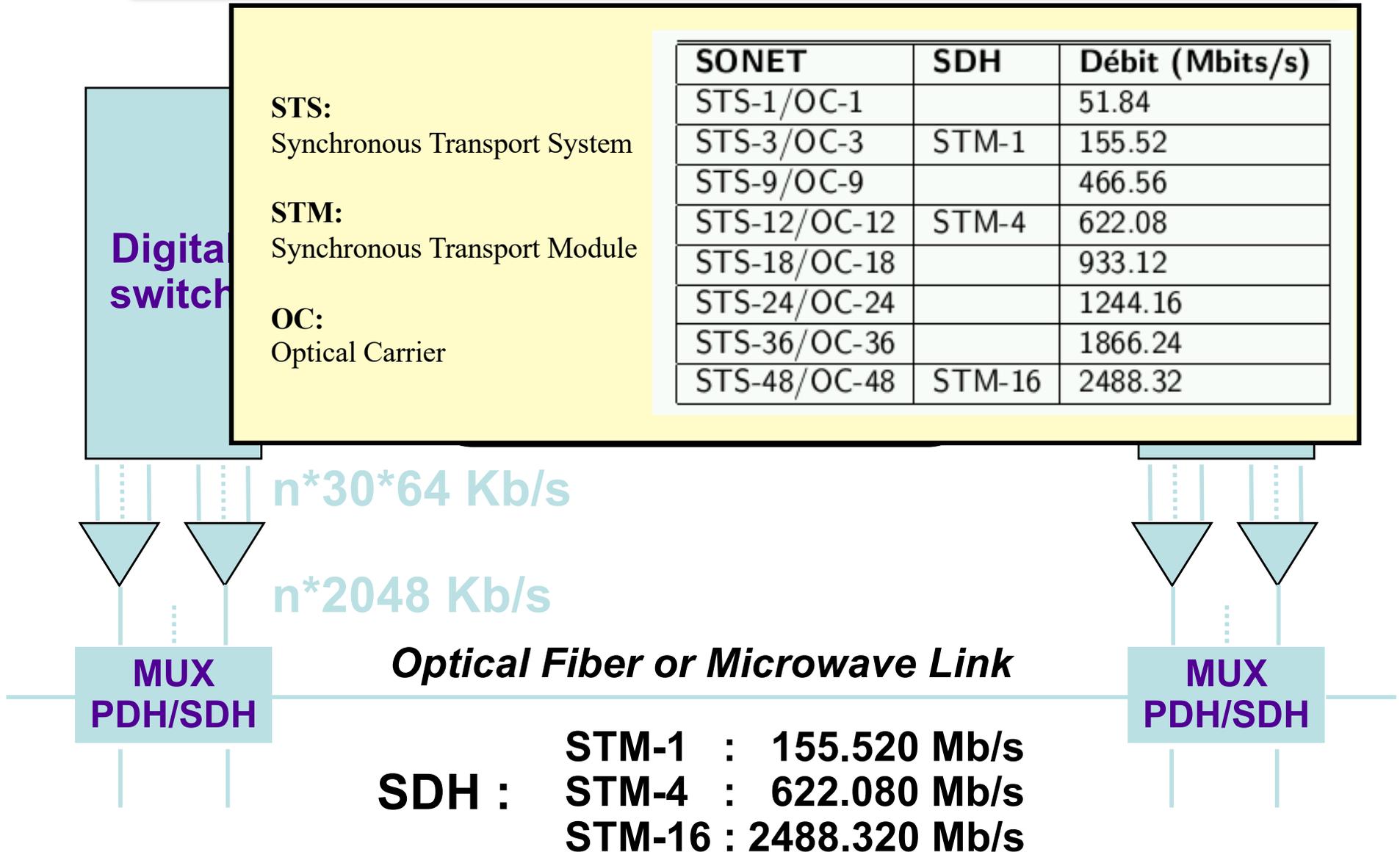


Advantages of circuits

- ❑ Provides the same path for information of the same connection: less out-of-order delivery
- ❑ Easier provisioning/reservation of network's resources: planning and management features



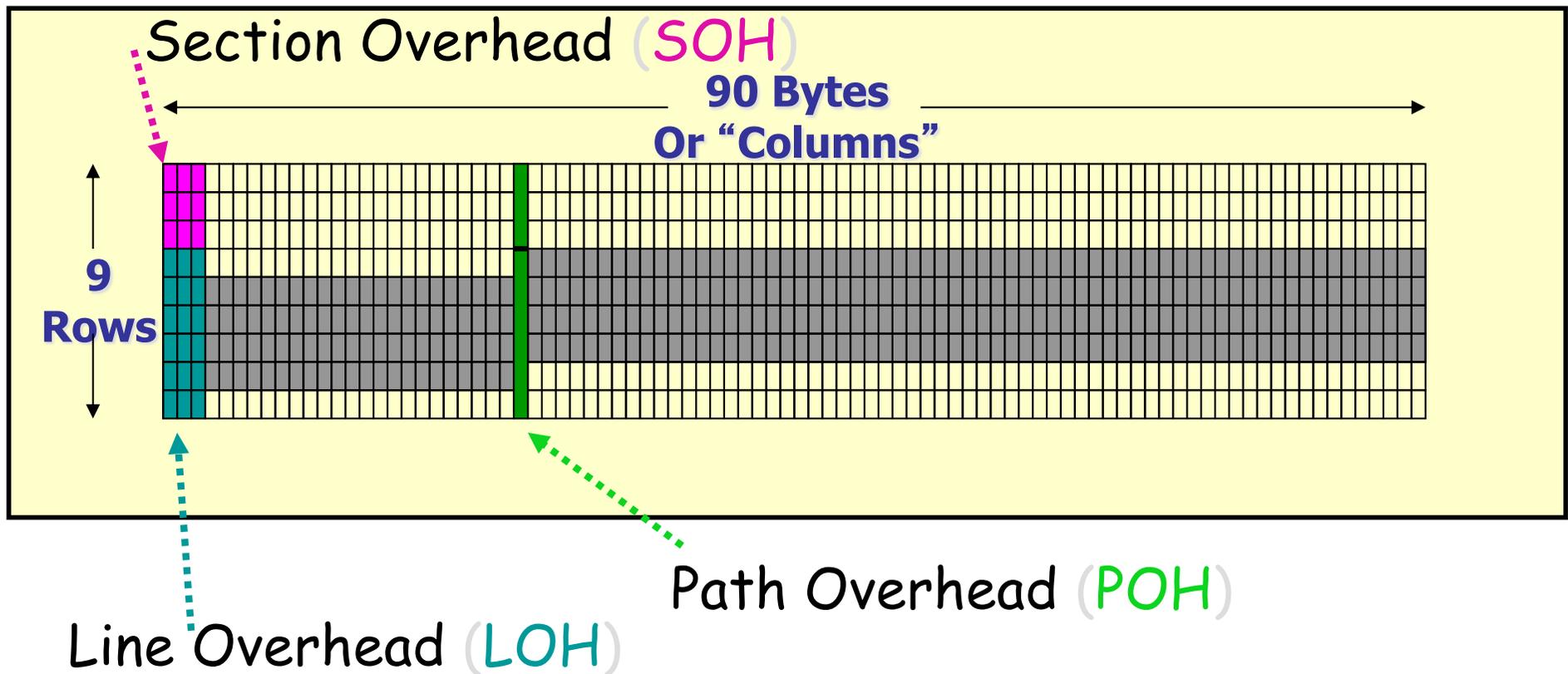
The core networks and SONET/SDH

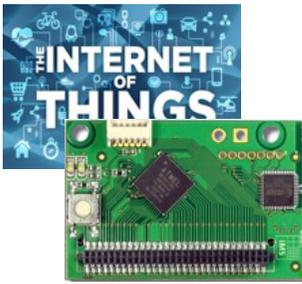




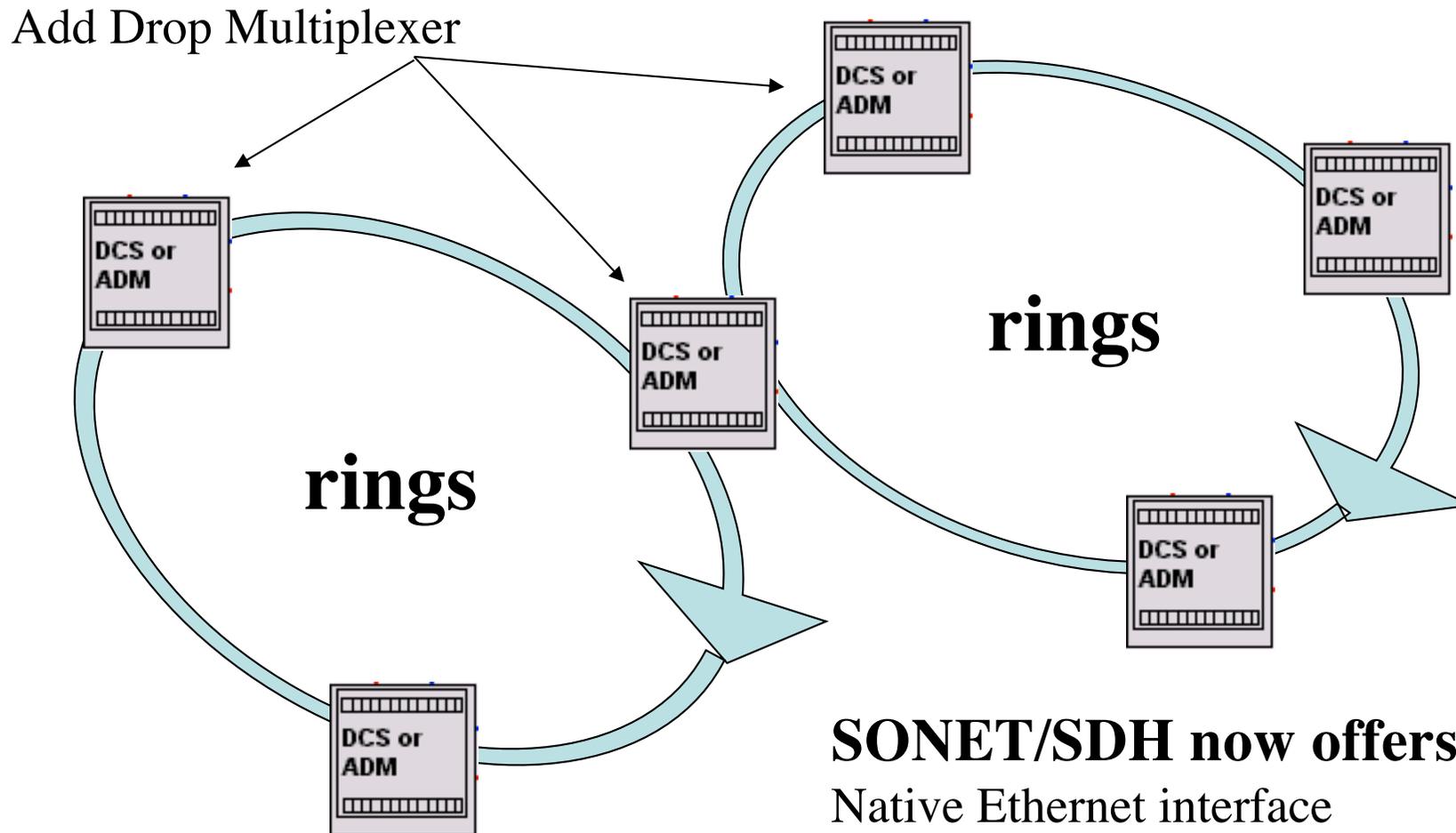
The SONET frame

- ❑ Basic frame length is 810 bytes
 - ❑ Sent every 125us, raw throughput of 51.84 Mbits/s (STS-1)
 - ❑ Better seen as a block with 90 columns and 9 lines
 - ❑ SDH has STM-1 which corresponds to an STS-3

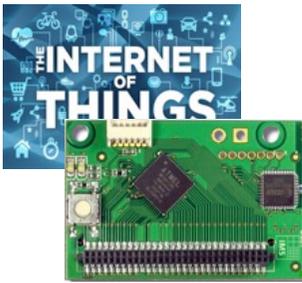




SONET/SDH transport network infrastructure



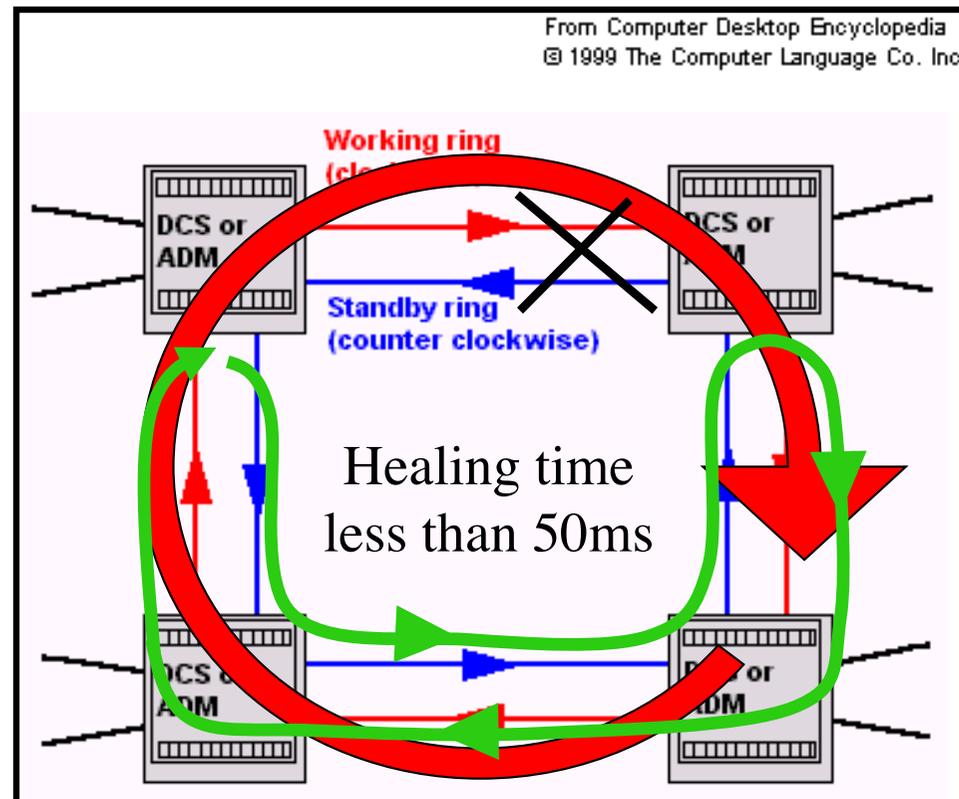
SONET/SDH now offers
Native Ethernet interface
Generic Framing Procedure
Virtual Concatenation

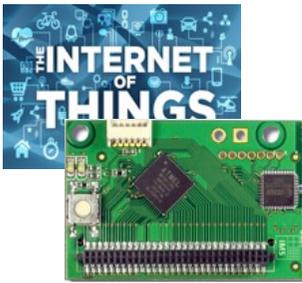


SONET/SDH and resiliency

- SONET/SDH has built-in fault-tolerant features with multiple rings
- Ex: simple case

DCS
(Digital Cross-Connects)

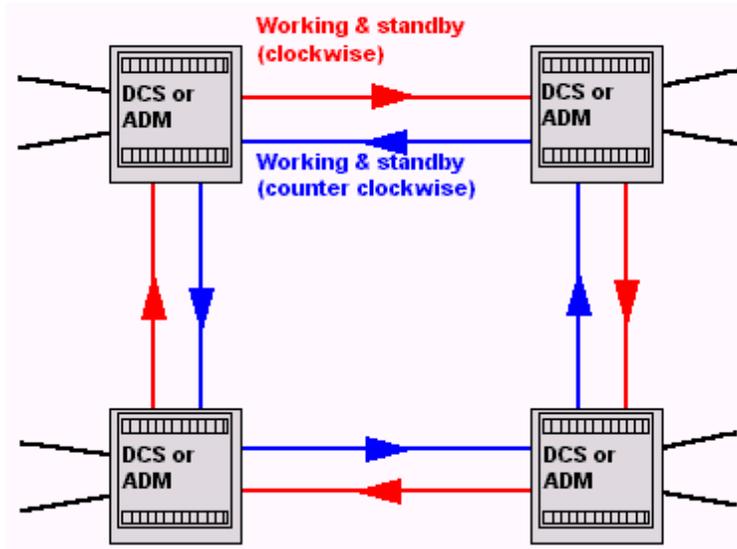




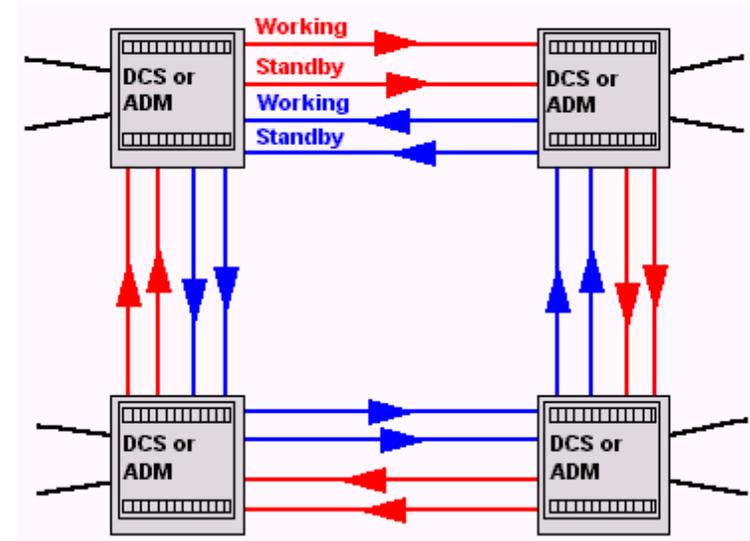
SONET/SDH and resiliency

From Computer Desktop Encyclopedia
© 1999 The Computer Language Co. Inc.

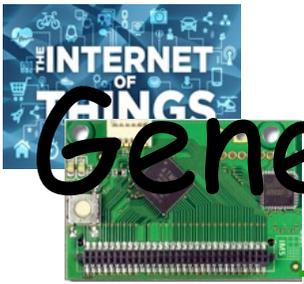
From Computer Desktop Encyclopedia
© 1999 The Computer Language Co. Inc.



bi-directional

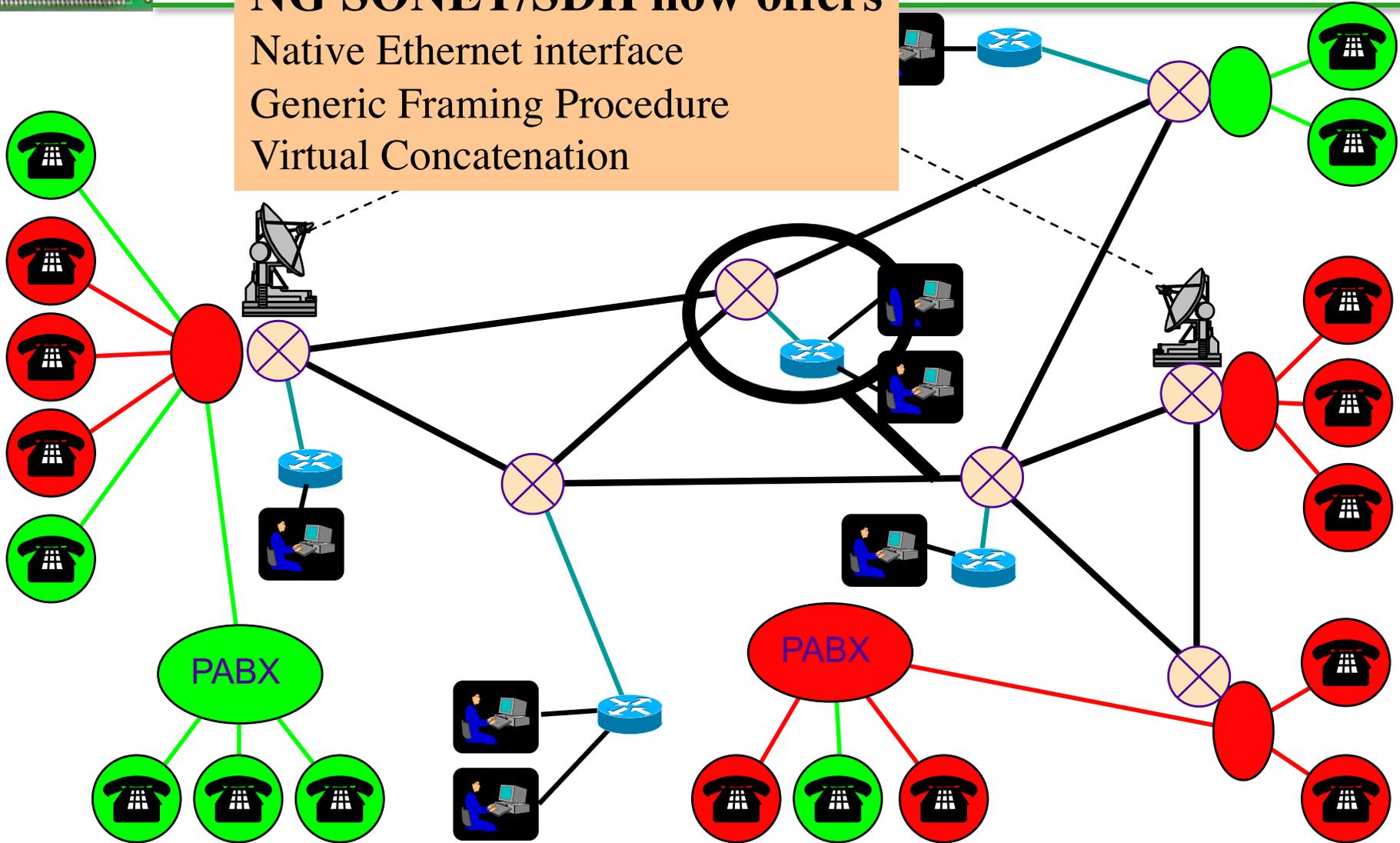


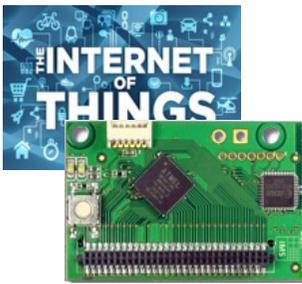
Found in most operators



General Purpose SDH Networks

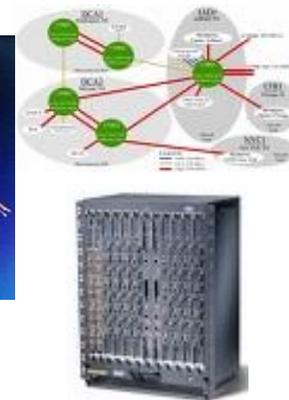
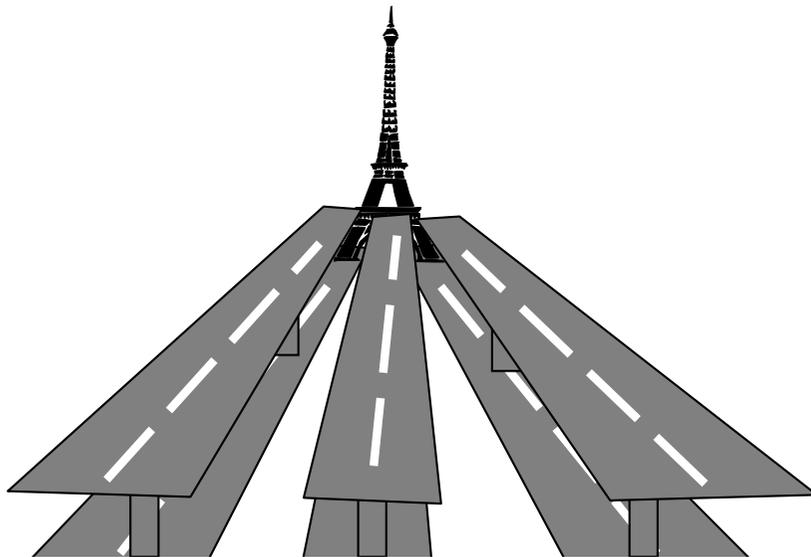
NG SONET/SDH now offers
Native Ethernet interface
Generic Framing Procedure
Virtual Concatenation

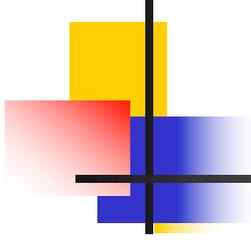




Overprovisioning in the core

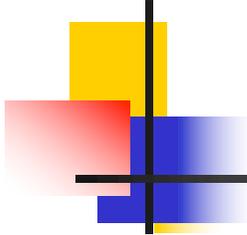
- ❑ Most operators are overprovisioning bandwidth with DWDM fibers
- ❑ 10Gbps, 40Gbps, 160 GBps, 320 Gbps
- ❑ Tbps links are also available!
- ❑ Overprovisioning may be a short-term solution that prevents optimizations but it works!





Dans les réseaux sans-fil

- Il y a nécessité de trouver des méthodes de modulations plus performantes
- La gestion des ressources, et surtout l'accès au support radio partagé est également plus complexe



Modulation en fréquence

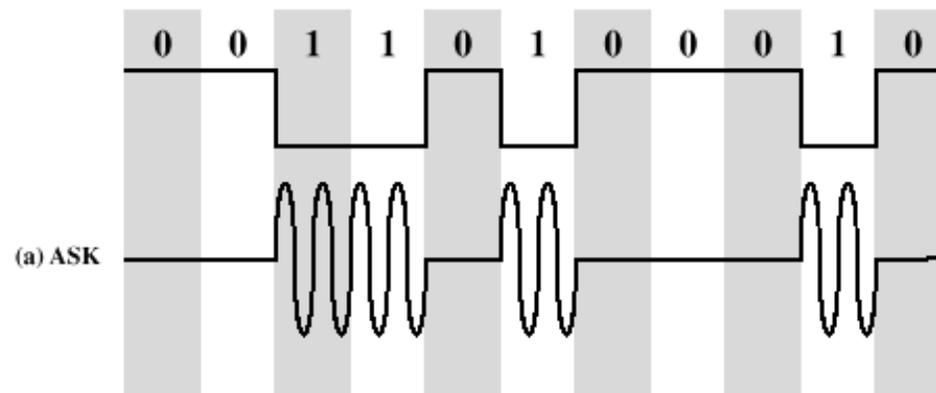
- La modulation est la transformation d'un message à transmettre en un signal adapté à la transmission sur un support physique.
- Les objectifs de la modulation sont:
 - une transposition dans un domaine de fréquences adapté au support de transmission;
 - une meilleure protection du signal contre le 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 .

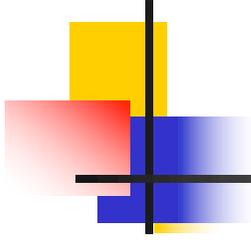
Amplitude-Shift Keying

- 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

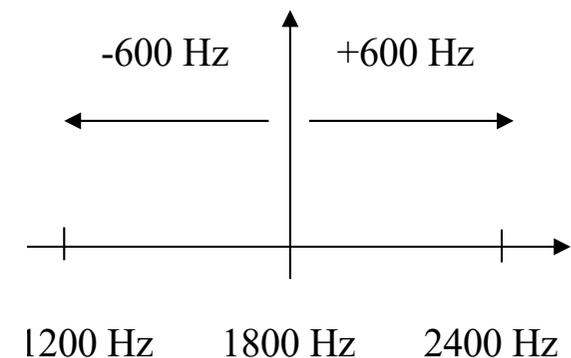
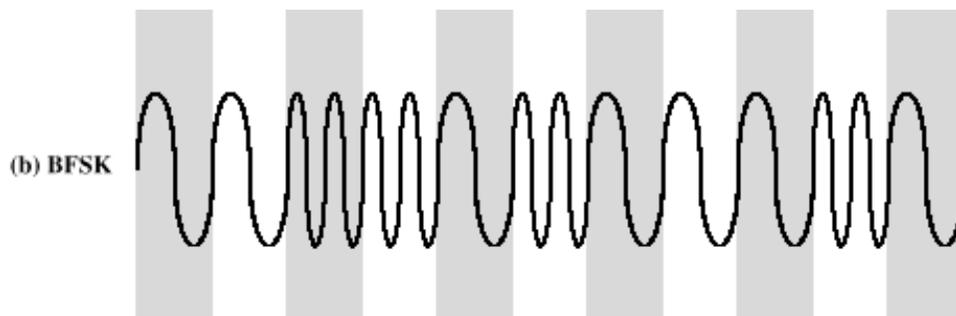
- Susceptible to sudden gain changes
- Inefficient modulation technique
- On voice-grade lines, used up to 1200 bps
- Used to transmit digital data over optical fiber

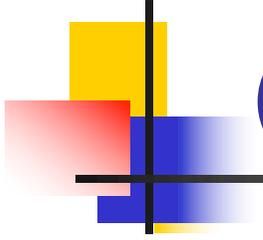
Frequency-Shift Keying: BFSK

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

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

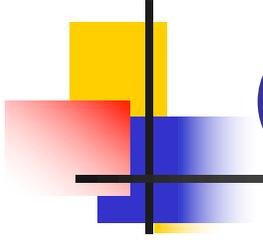
- where f_1 and f_2 are offset from carrier frequency f_c by equal but opposite amounts





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)

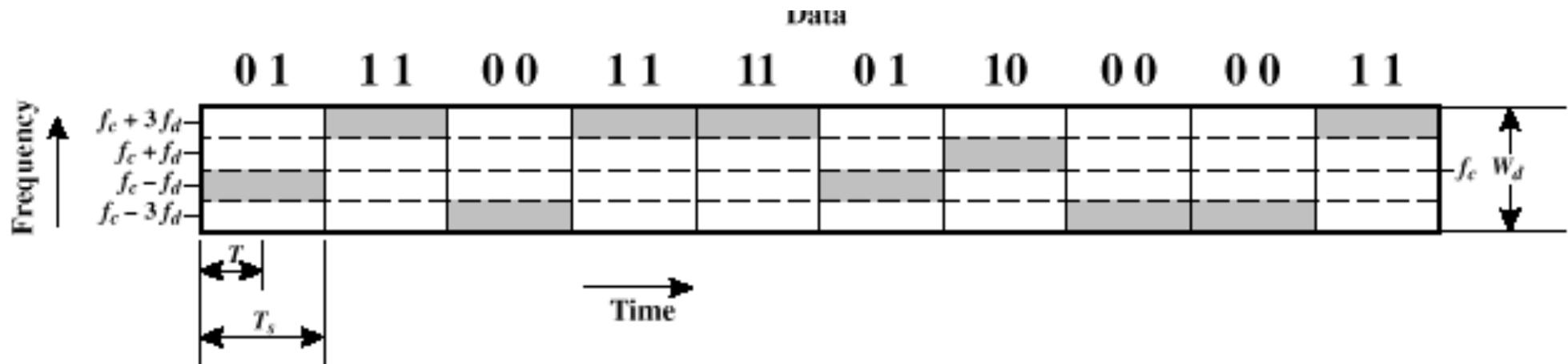
- More than two frequencies are used
- More bandwidth efficient but more susceptible to error

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

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



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

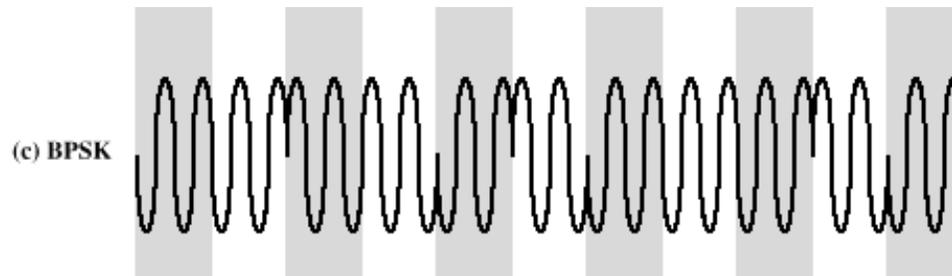
Figure 6.4 MFSK Frequency Use ($M = 4$)

Phase-Shift Keying (PSK)

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

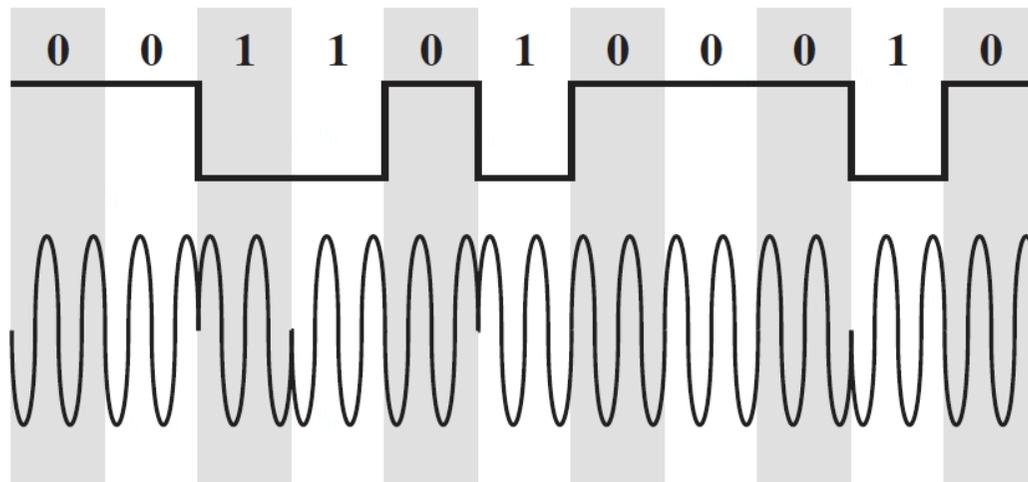
$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{binary 0} \end{cases}$$

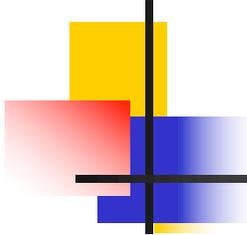
$$= \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ -A \cos(2\pi f_c t) & \text{binary 0} \end{cases}$$



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

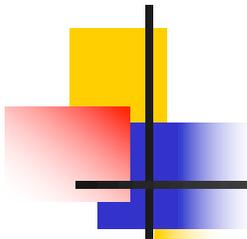




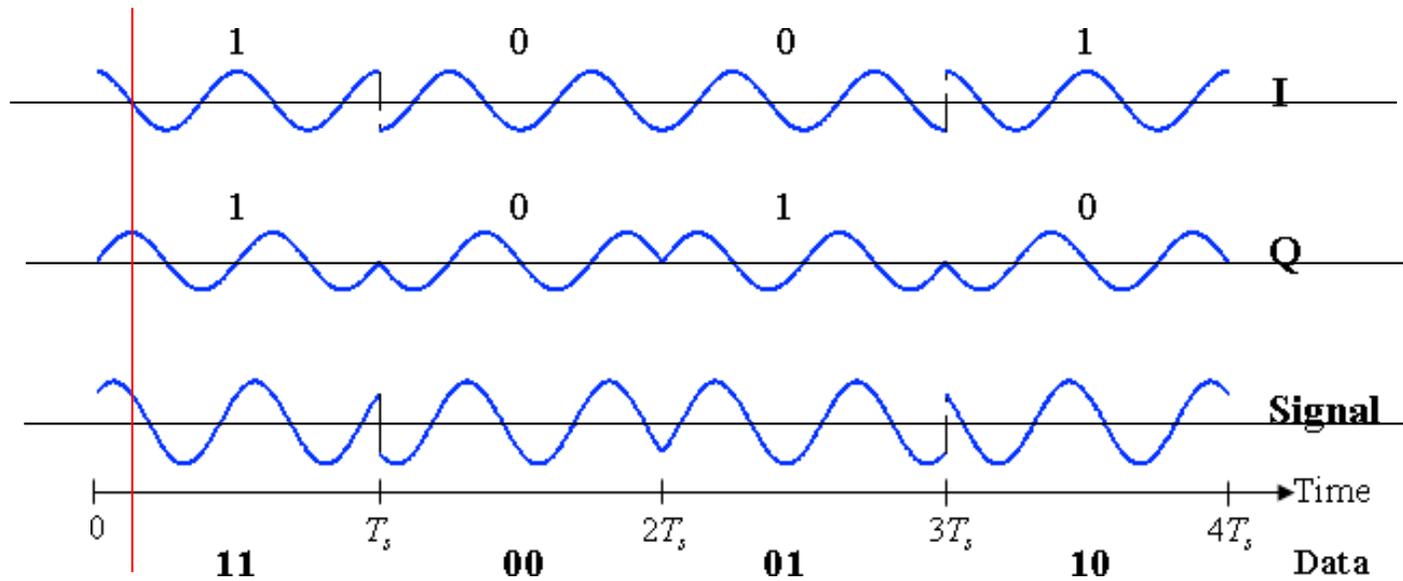
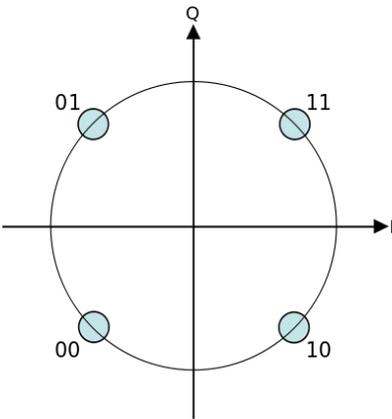
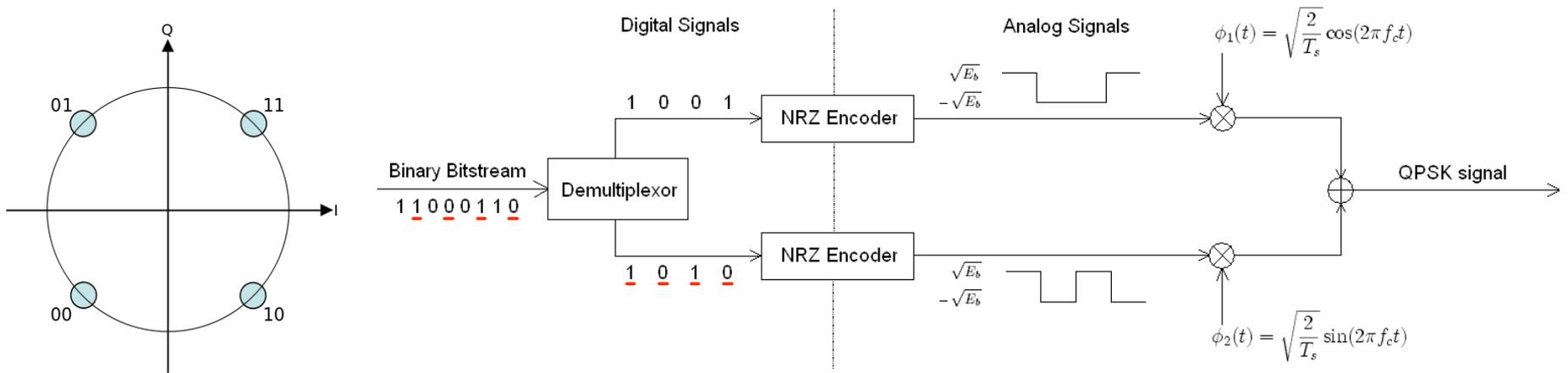
Phase-Shift Keying (PSK)

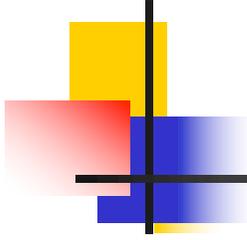
- Four-level PSK (QPSK or 4-PSK)
 - Each element represents more than one bit

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



QPSK



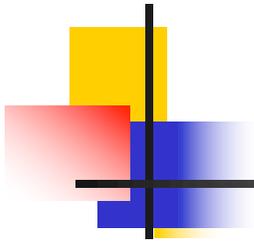


Phase-Shift Keying (PSK)

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

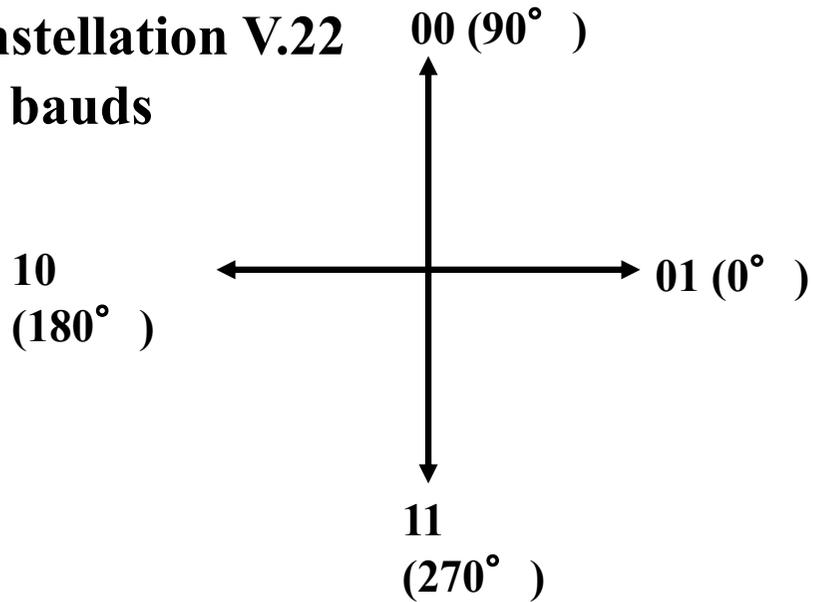
$$D = \frac{R}{L} = \frac{R}{\log_2 M}$$

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

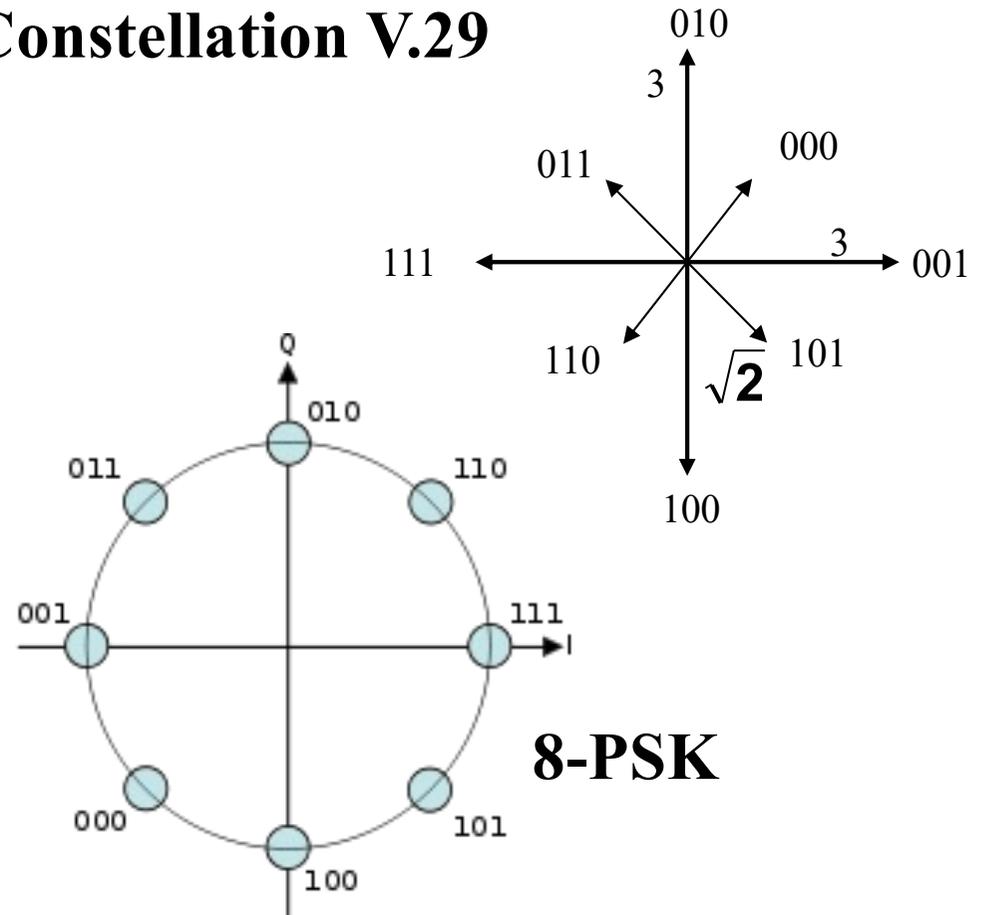


QPSK and MPSK

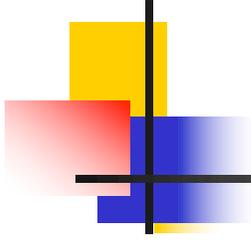
Constellation V.22
600 bauds



Constellation V.29



8-PSK



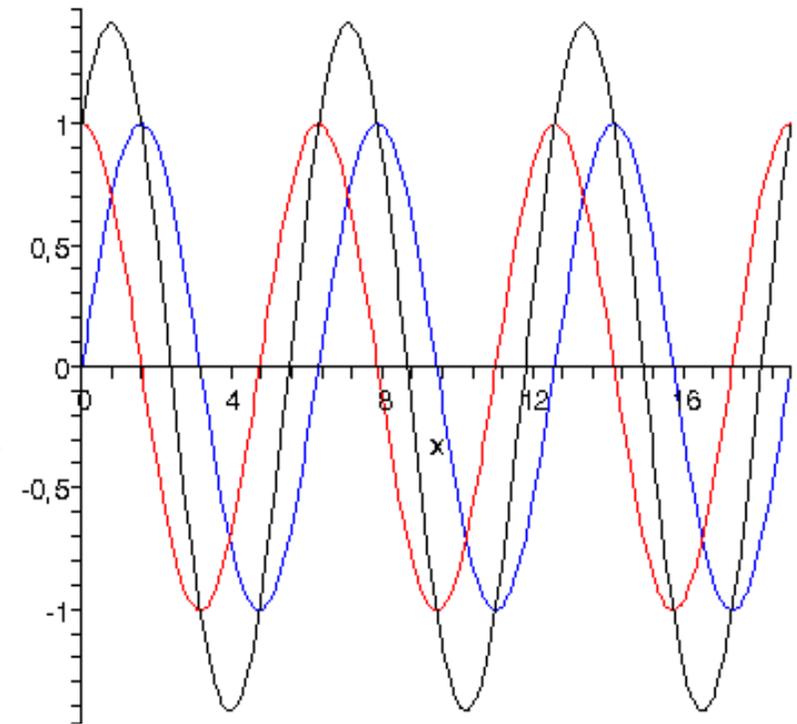
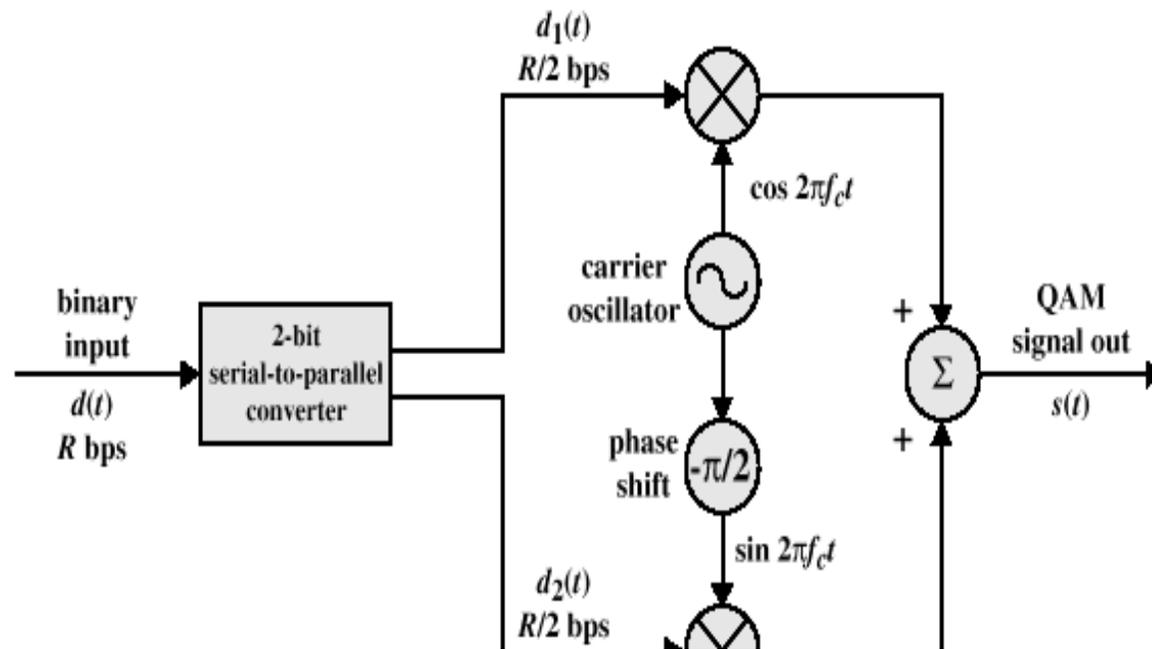
Quadrature Amplitude Modulation

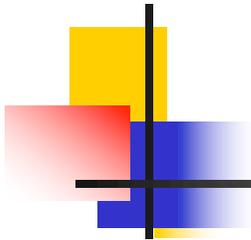
- QAM is a combination of ASK and PSK
 - Two different signals sent simultaneously on the same carrier frequency

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

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

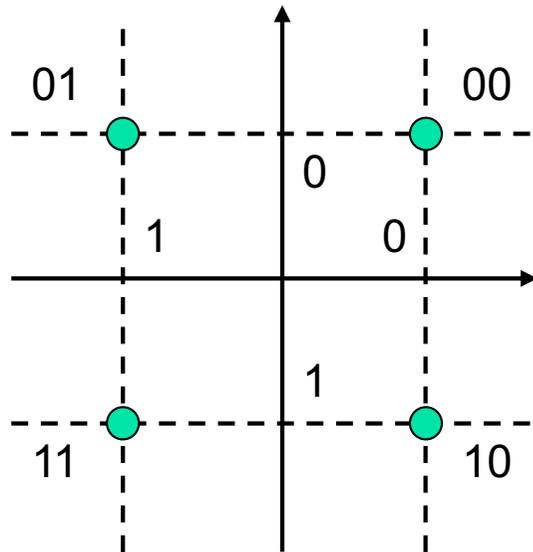
QAM modulator



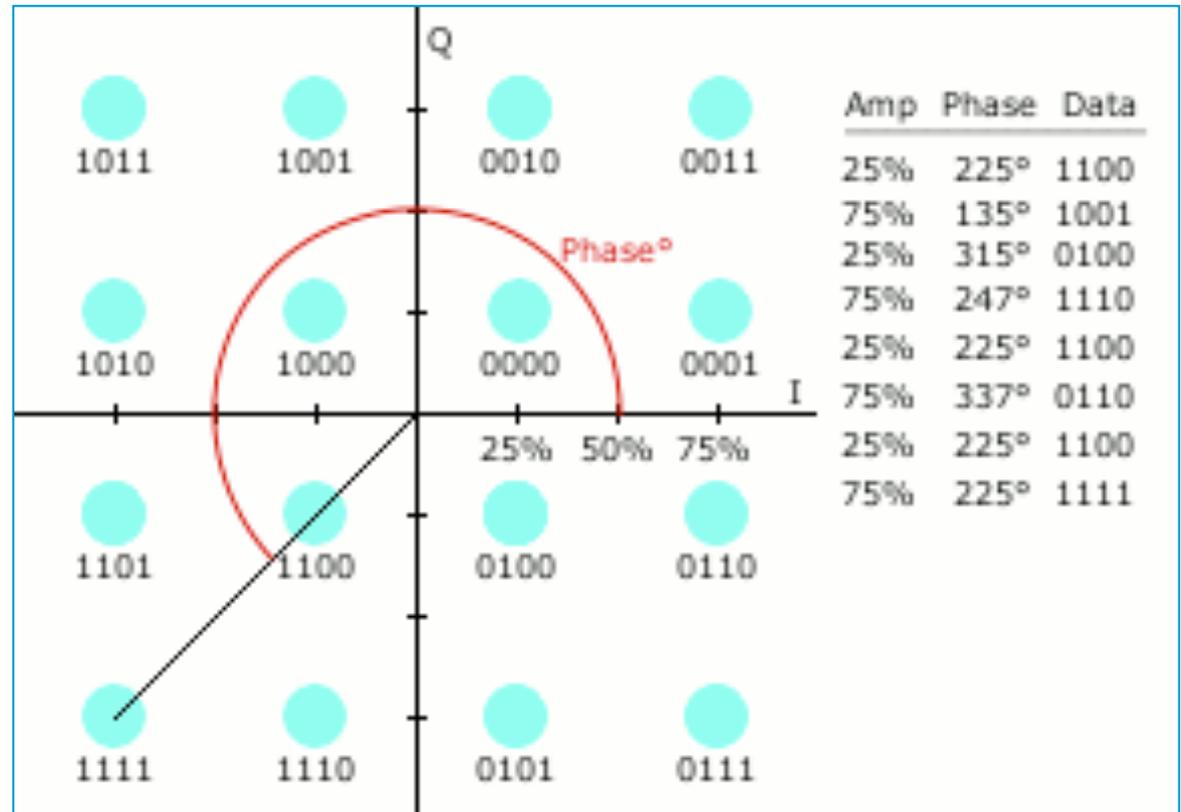


4-QAM, 16-QAM

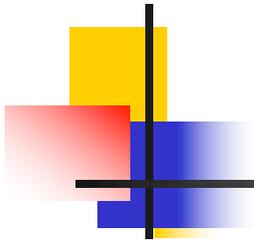
Modulation de phase
4 états (2 bits)



Quadrature Amplitude Modulation
QAM 16



Source wikipedia



64-QAM, 128-QAM

Quadrature Amplitude Modulation

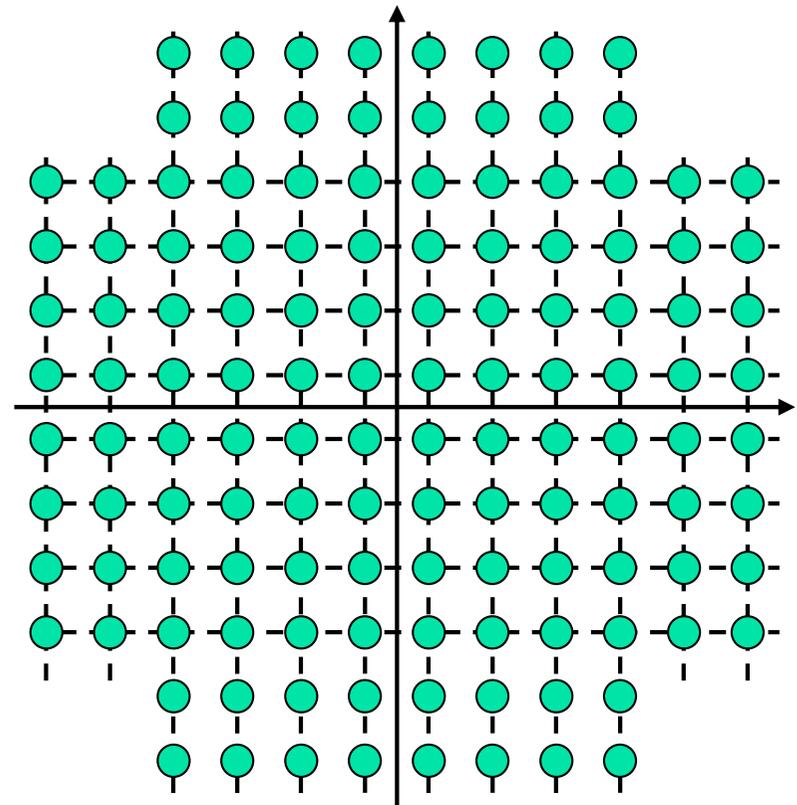
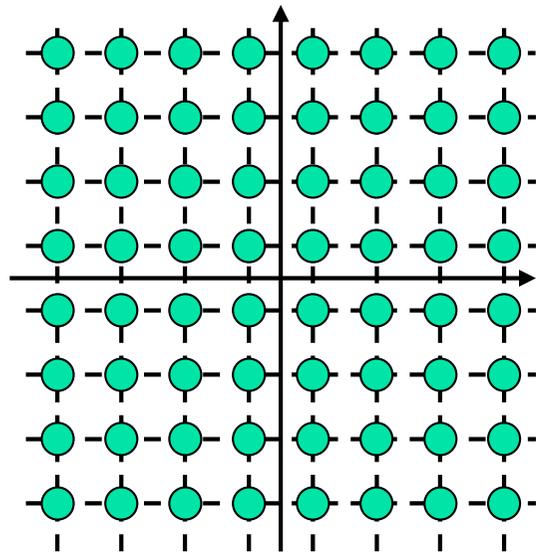
QAM 128

128 états (7 bits)

Quadrature Amplitude Modulation

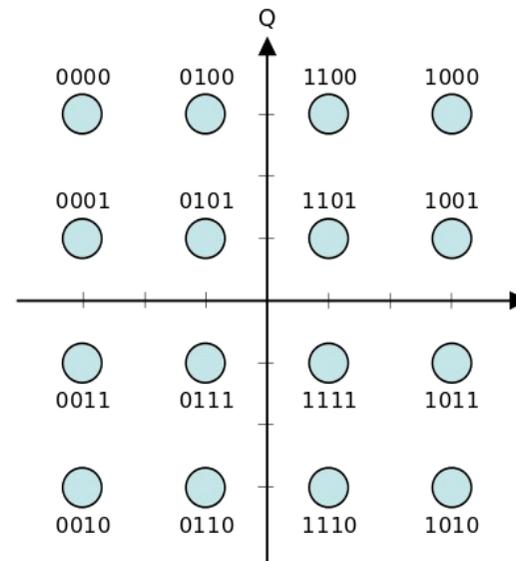
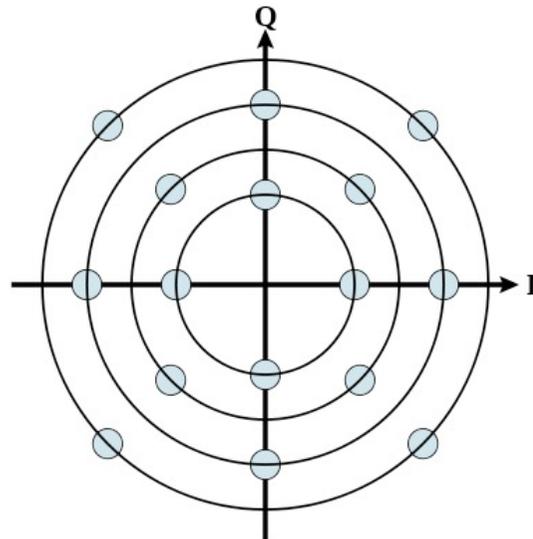
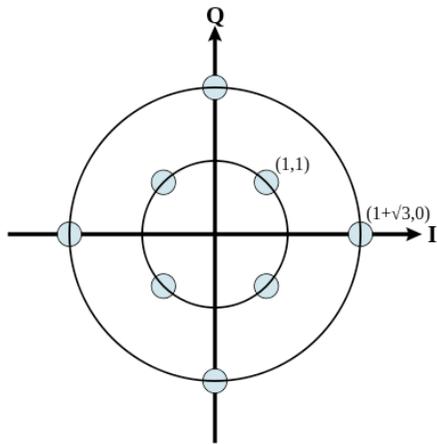
QAM 64

64 états (6 bits)

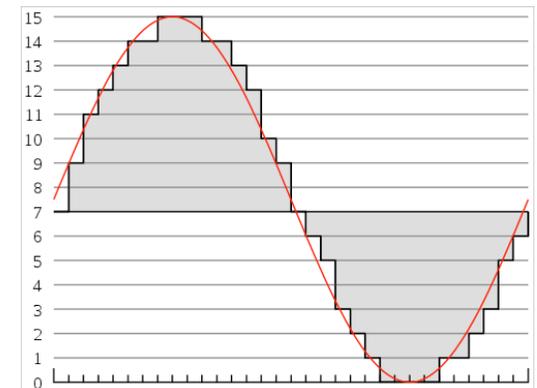
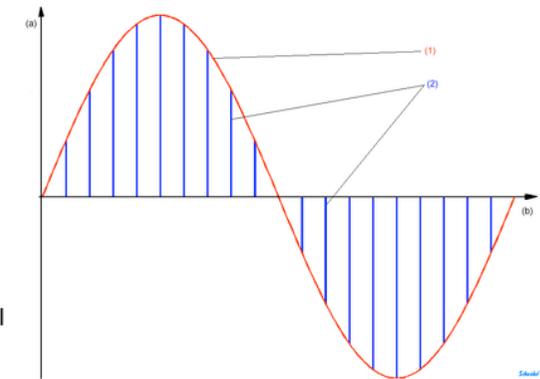


Non-rectangular QAM

- 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

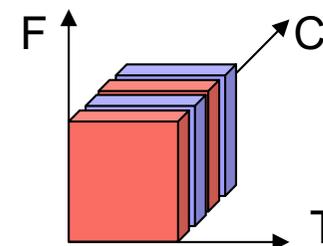
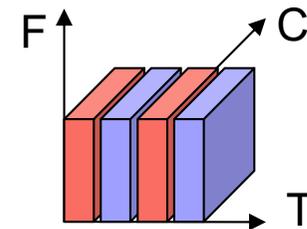
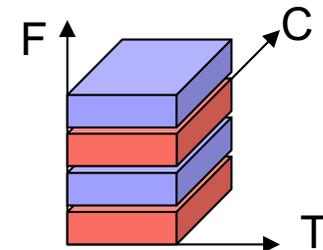


Source wikipedia



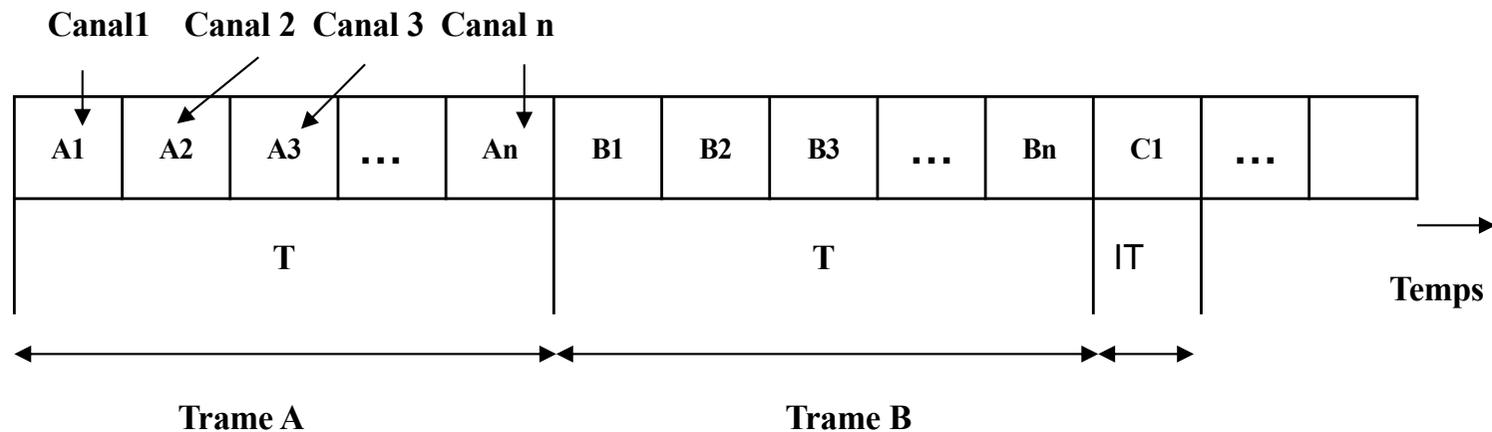
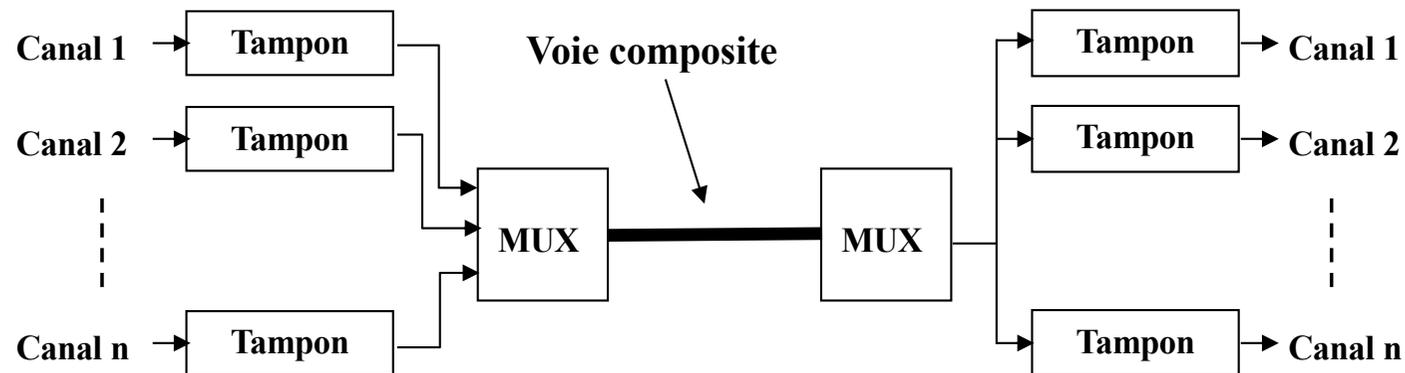
Multiplexage

- **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 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

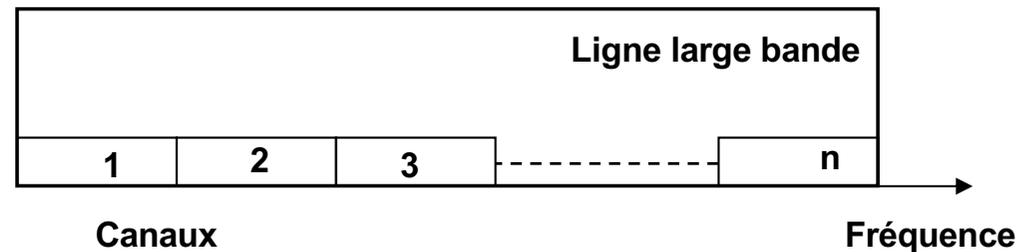
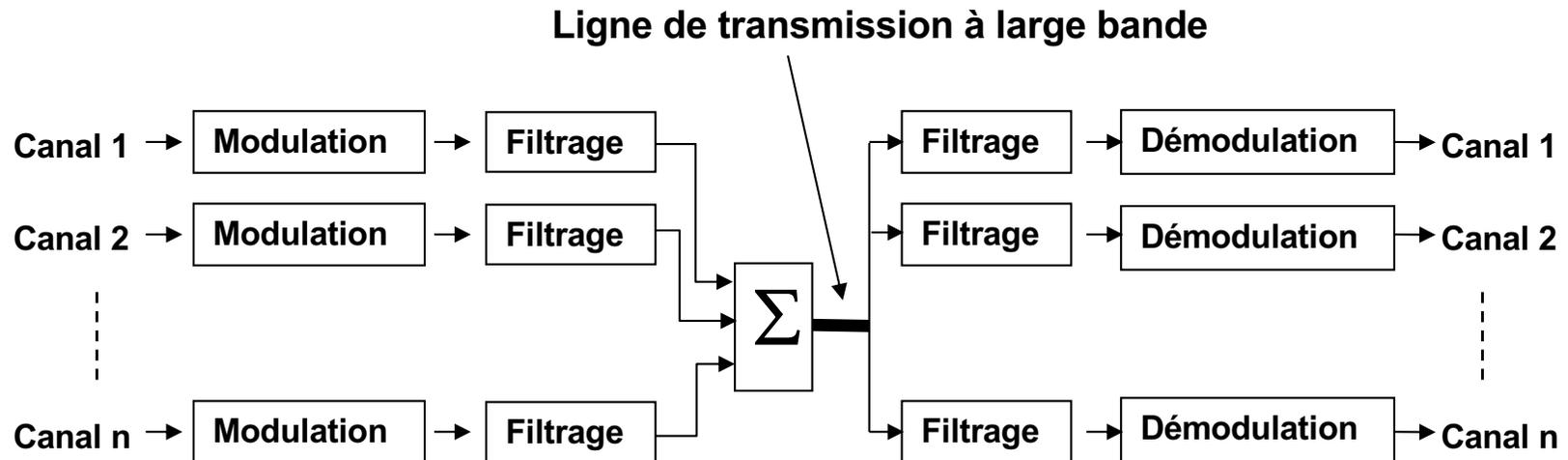
$$d = D/n$$

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

$$T = n \times IT$$

Multiplexage en fréquences

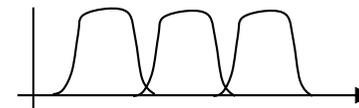
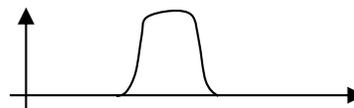
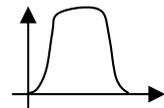
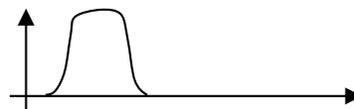
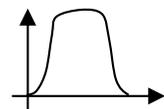
- **Partage de la bande de fréquences** disponible en plusieurs canaux (ou sous-bandes) plus étroits : en permanence chacun de ces canaux est affecté à un "utilisateur" exclusif



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



300 3400 Hz

60 64 68 72 KHz

60 64 68 72 KHz

Bandes de
fréquences
originales

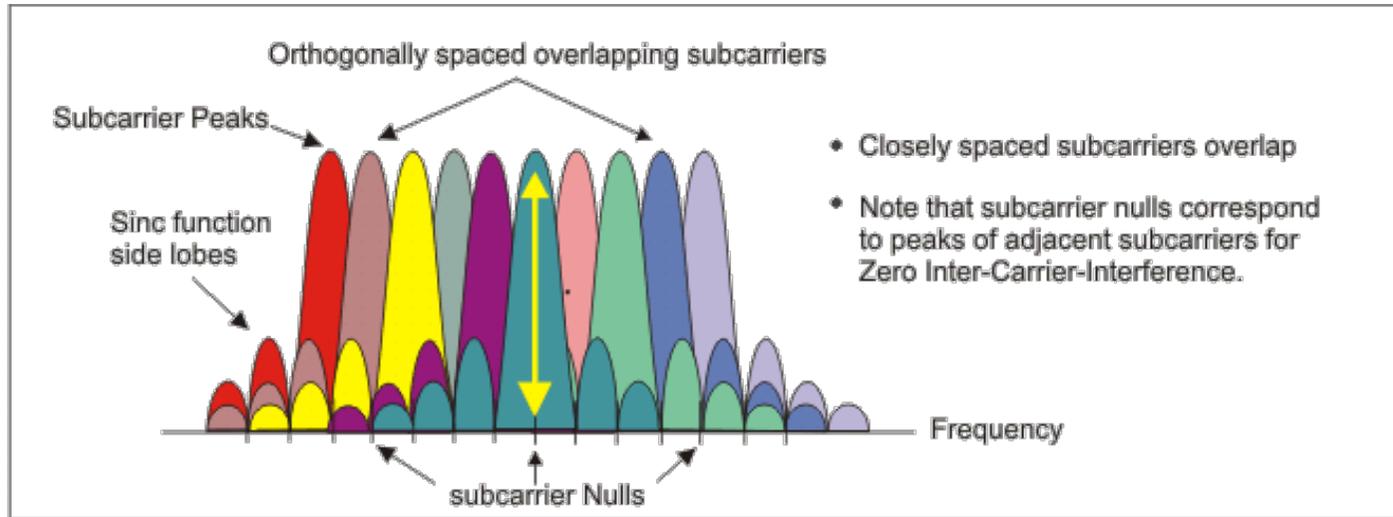
Bandes après
transposition en
fréquence

Bandes regroupées sur
le canal multiplexé

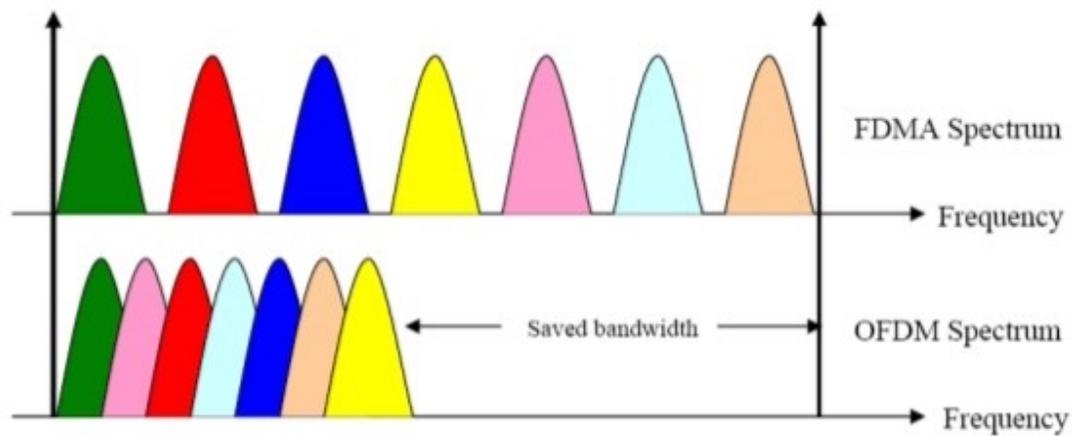
OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)

- 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

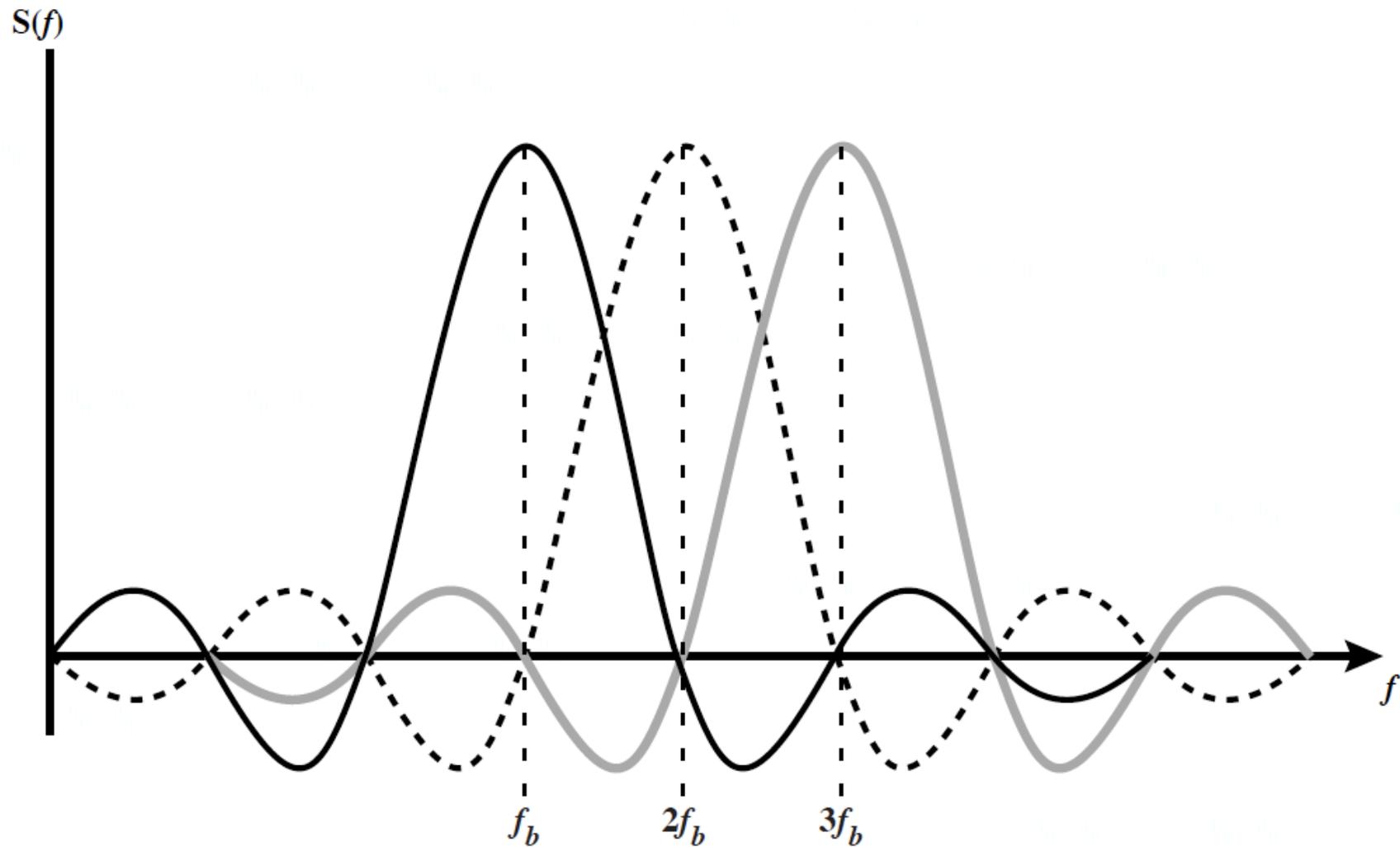
OFDM



OFDM Signal Frequency Spectra



OFDM



(b) Three subcarriers in frequency domain

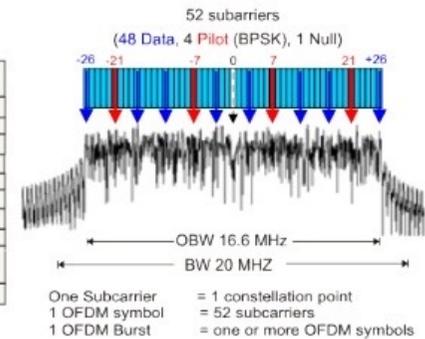
OFDM et WiFi

Réseaux locaux 802.11 : standards physiques [masquer]									
Protocole 802.11	date ¹	Fréquence (GHz)	largeur de bande (MHz, GHz)	Débit binaire ² (Mbit/s, Gbit/s)	Nombre maximum de flux MIMO	Codage / Modulation	Portée		
							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, 3,7 ^[A]	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s	1	OFDM	35 m	120 m	
							—	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)	250 m ⁴	
			40 MHz	15 à 150 Mbit/s ^[B] (13,5 à 135) ^[C]			12-35 m (5 GHz)		
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 588,9 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 Wi-Fi](#)

WiFi OFDM parameters

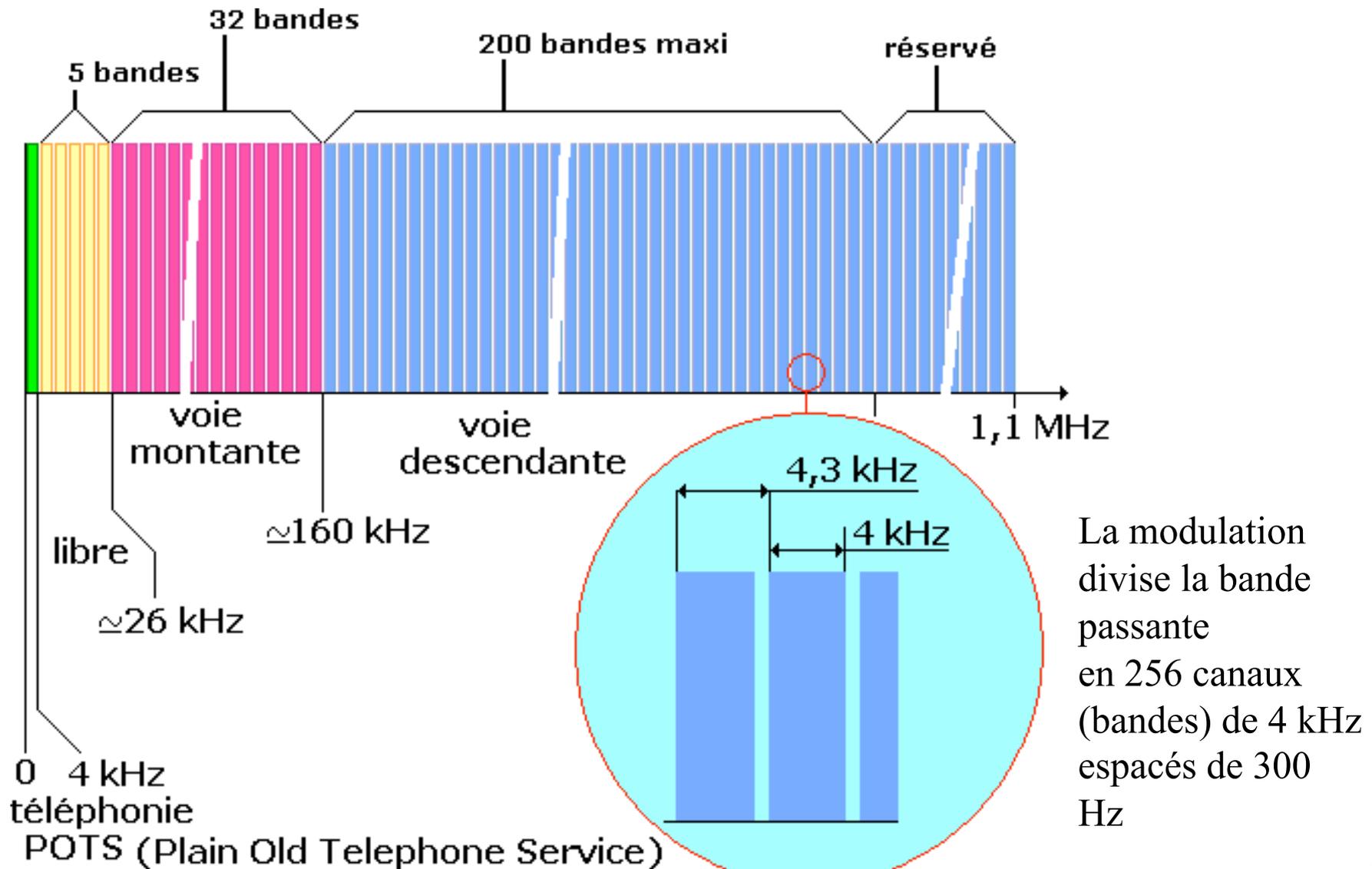
802.11a OFDM PHY Parameters	
BW	20 MHz
OBW	16.6 MHz
Subcarrier Spacing	312.5 Khz (20MHz/64 Pt FFT)
Information Rate	6/9/12/18/24/36/48/54 Mbits/s
Modulation	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Coding Rate	1/2, 2/3, 3/4
Total Subcarriers	52 (Freq index -26 to +26)
Data Subcarriers	48
Pilot Subcarriers*	4 (-21, -7, +7, +21) *Always BPSK
DC Subcarrier	Null (0 subcarrier)



802.11a OFDM Physical Parameters

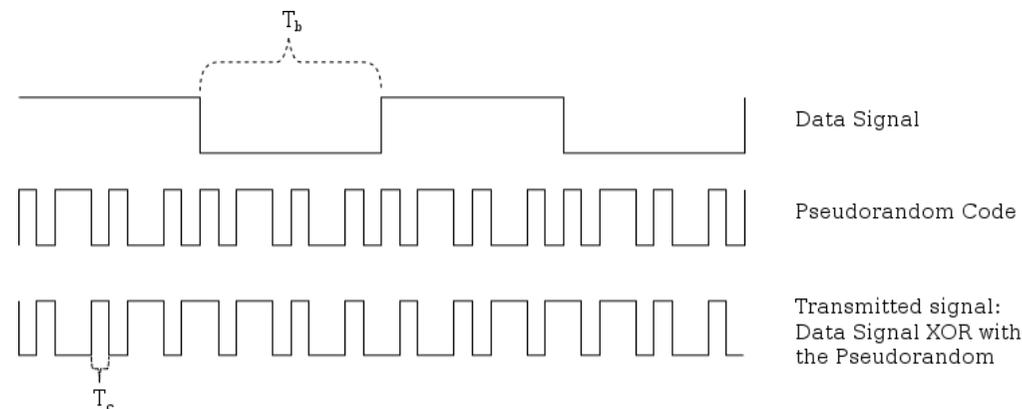
IFFT size (N) = 64 (52 used subcarriers + 1 DC + 11 guard subcarriers)
IFFT output duration (T) = 1 / subcarrier spacing = $1 / (312.5 \times 10^3) = 3.2 \mu\text{s}$
Cyclic prefix length = $T_g = 0.8 \mu\text{s} = T/4$
Sample time (T_s) = $1 / (20 \times 10^6) = 0.05 \mu\text{s}$
Used BW (B_{used}) = 53 (52 + 1 DC) subcarriers \times 312.5 kHz = 16.6 MHz = OBW = Occupied BW

La variante DMT pour DSL



CDMA (Code Division Multiple Access)

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

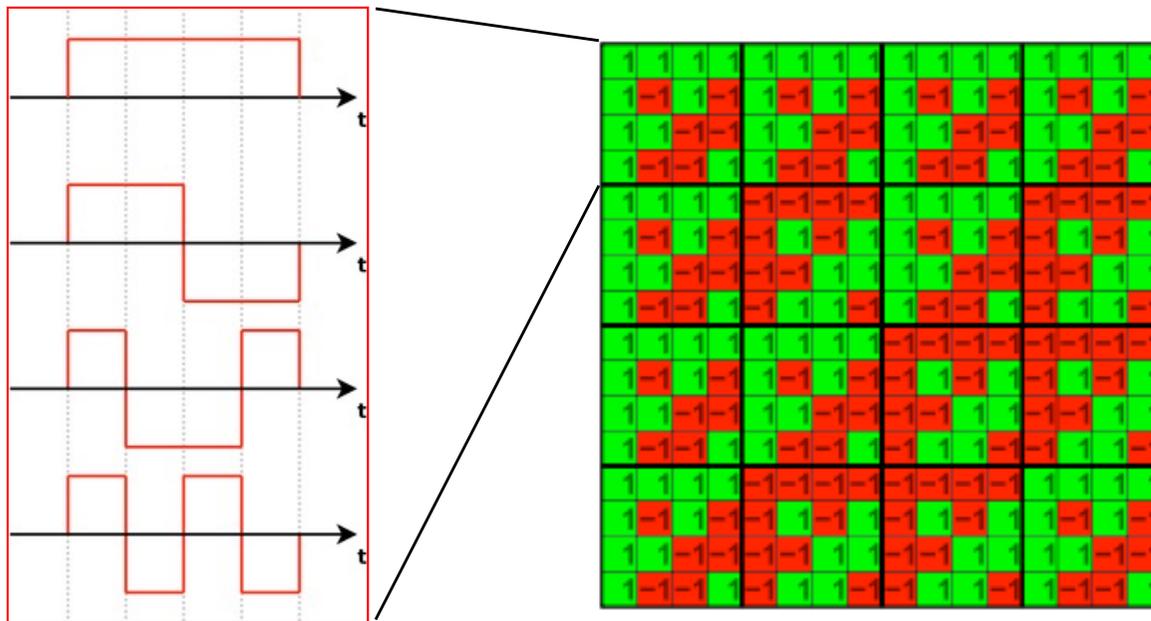


- Exploite les propriétés mathématiques entre les codes orthogonaux. 2 codes sont orthogonaux si le produit scalaire de leur vecteur associés est nul. $u = (a, b)$ and $v = (c, d)$ alors $u.v = a.c+b.d$
- Ex: $u=(1,1)$, $v=(1,-1)$

CDMA, suite

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

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



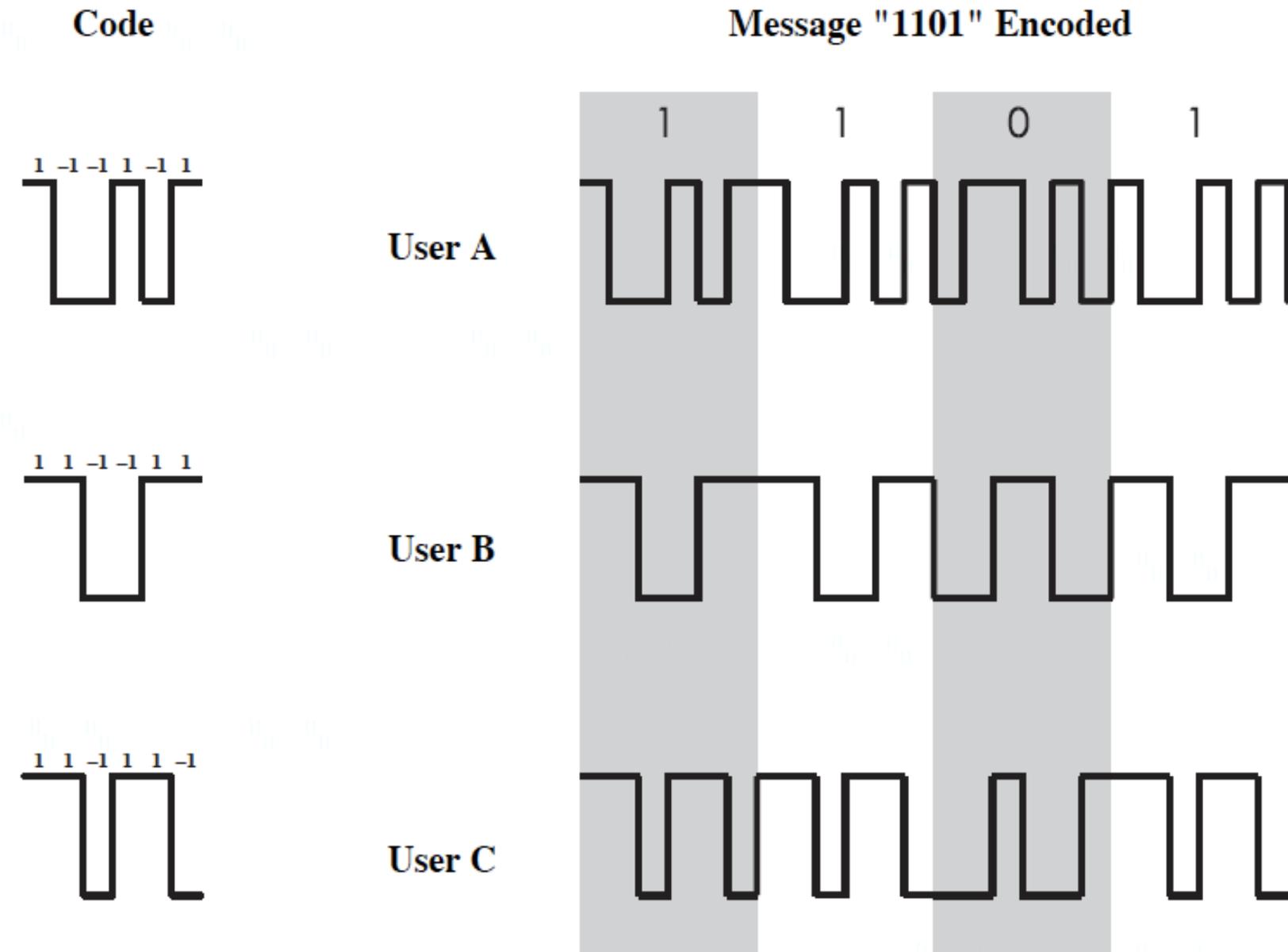
- Le produit scalaire entre 2 lignes ou 2 colonnes est nul. Les codes associés sont orthogonaux.

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



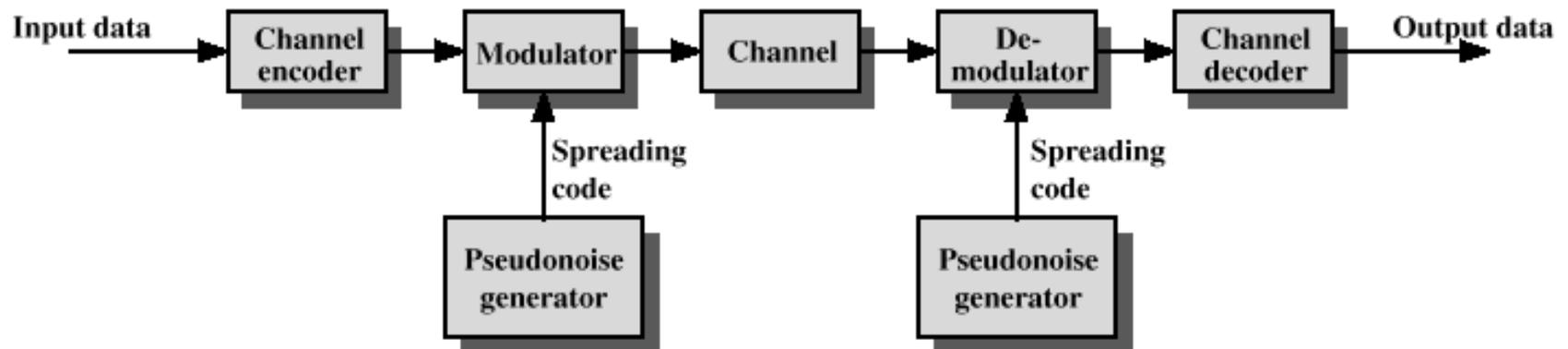
CDMA, transmission et décodage

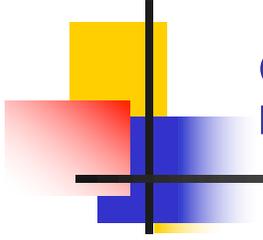
- Now, due to physical properties of interference, if two signals at a point are in phase, they add to give twice the amplitude of each signal, but if they are out of phase, they subtract and give a signal that is the difference of the amplitudes. Digitally, this behaviour can be modelled by the addition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

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, ...

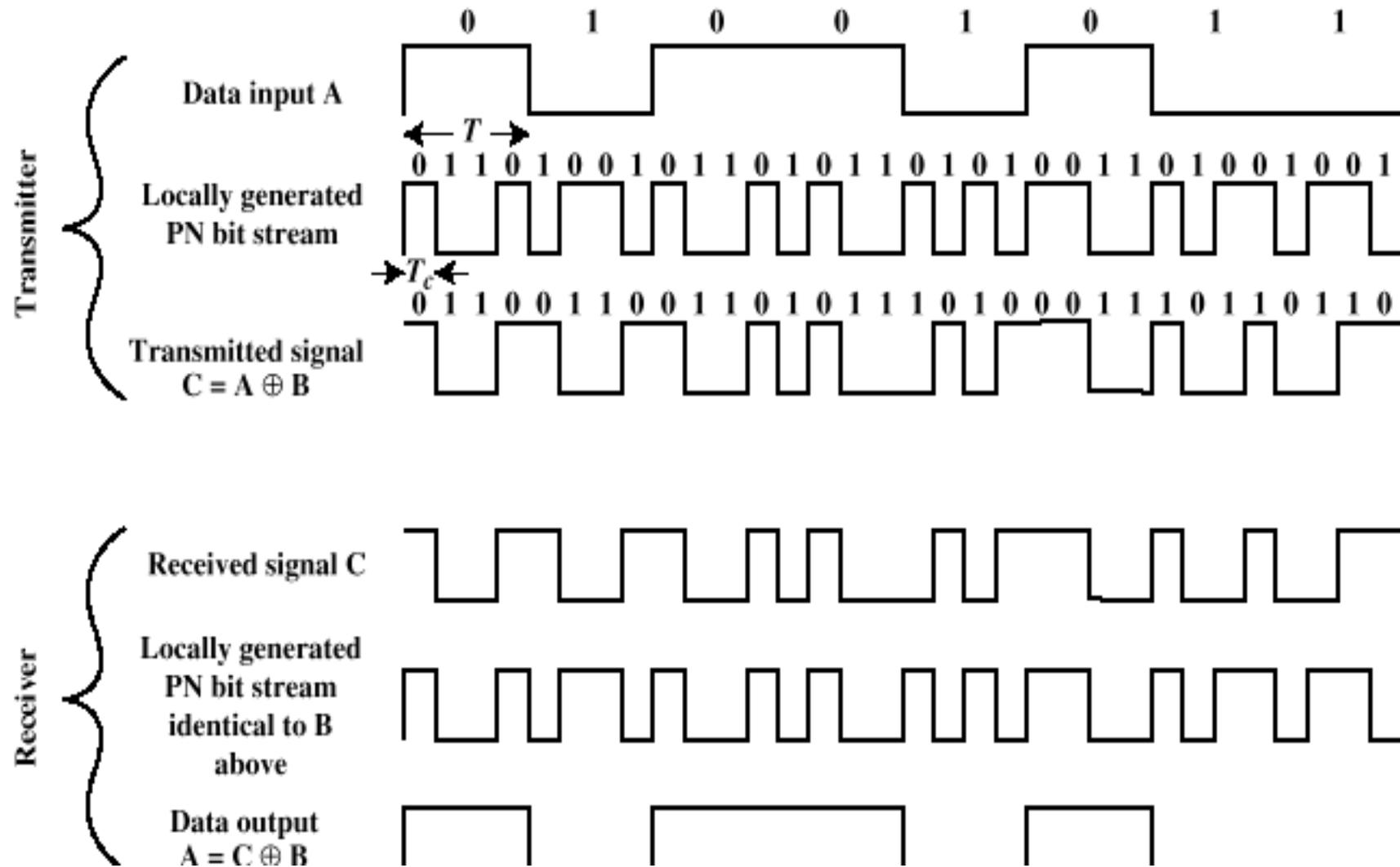


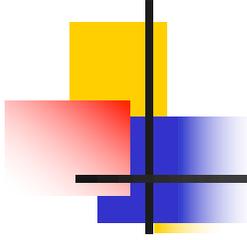


Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

- 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,

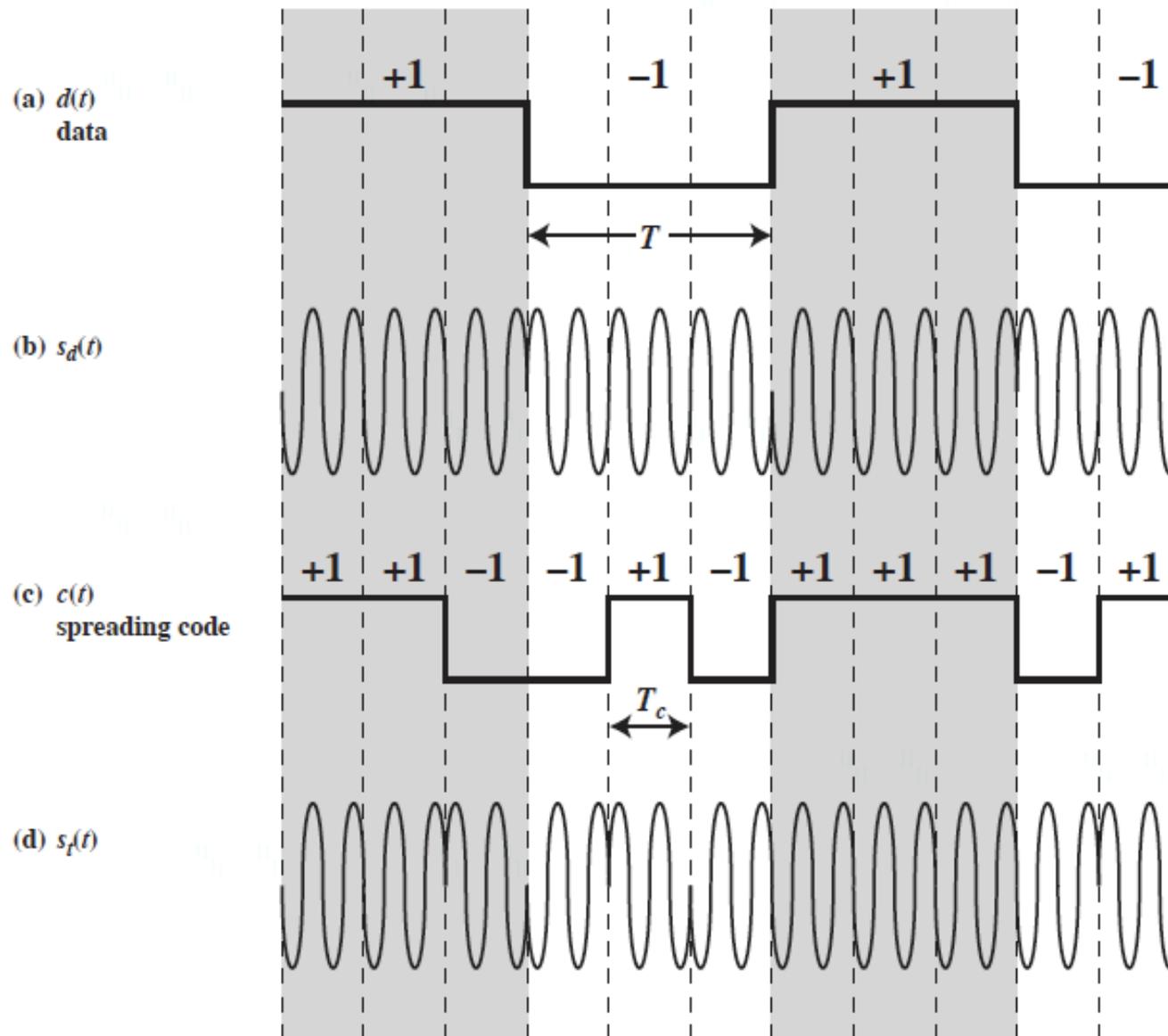
$$s_d(t) = A d(t) \cos(2\pi f_c t)$$

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

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

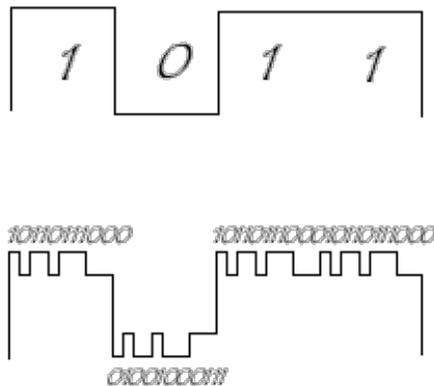
- A = amplitude of signal
 - f_c = carrier frequency
 - $d(t)$ = discrete function [+1, -1]
- At receiver, incoming signal multiplied by $c(t)$
 - Since, $c(t) \times c(t) = 1$, incoming signal is recovered

DSSS Using BPSK (2)

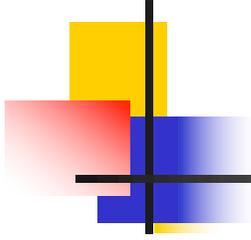


Direct Sequence Spread Spectrum in 802.11

- 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*.

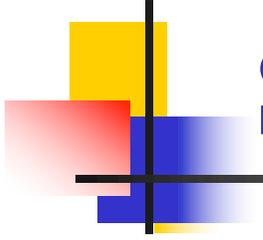


- Redondance=contrôle d'erreurs et possibilité de correction



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

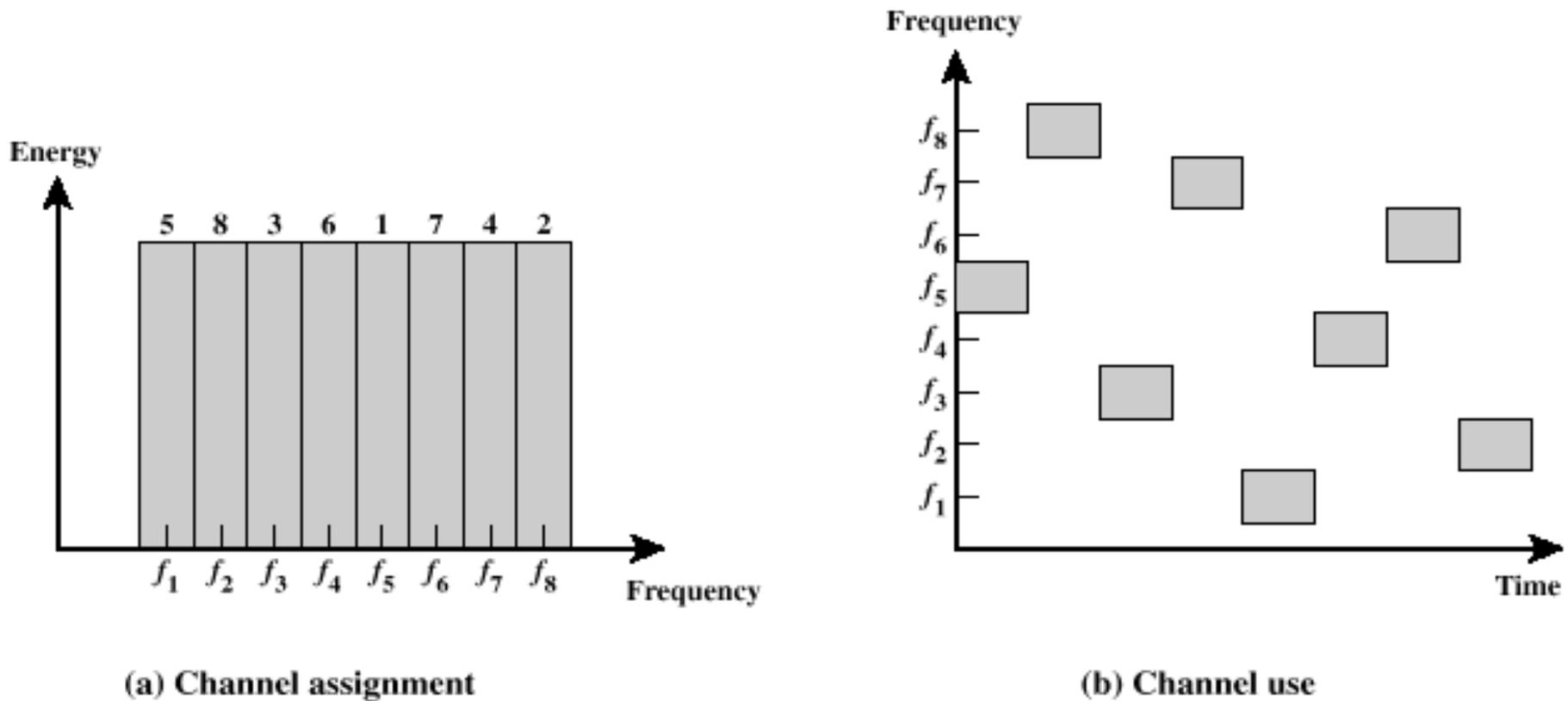
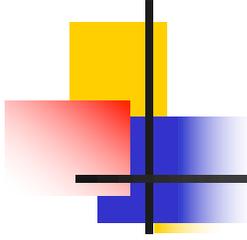


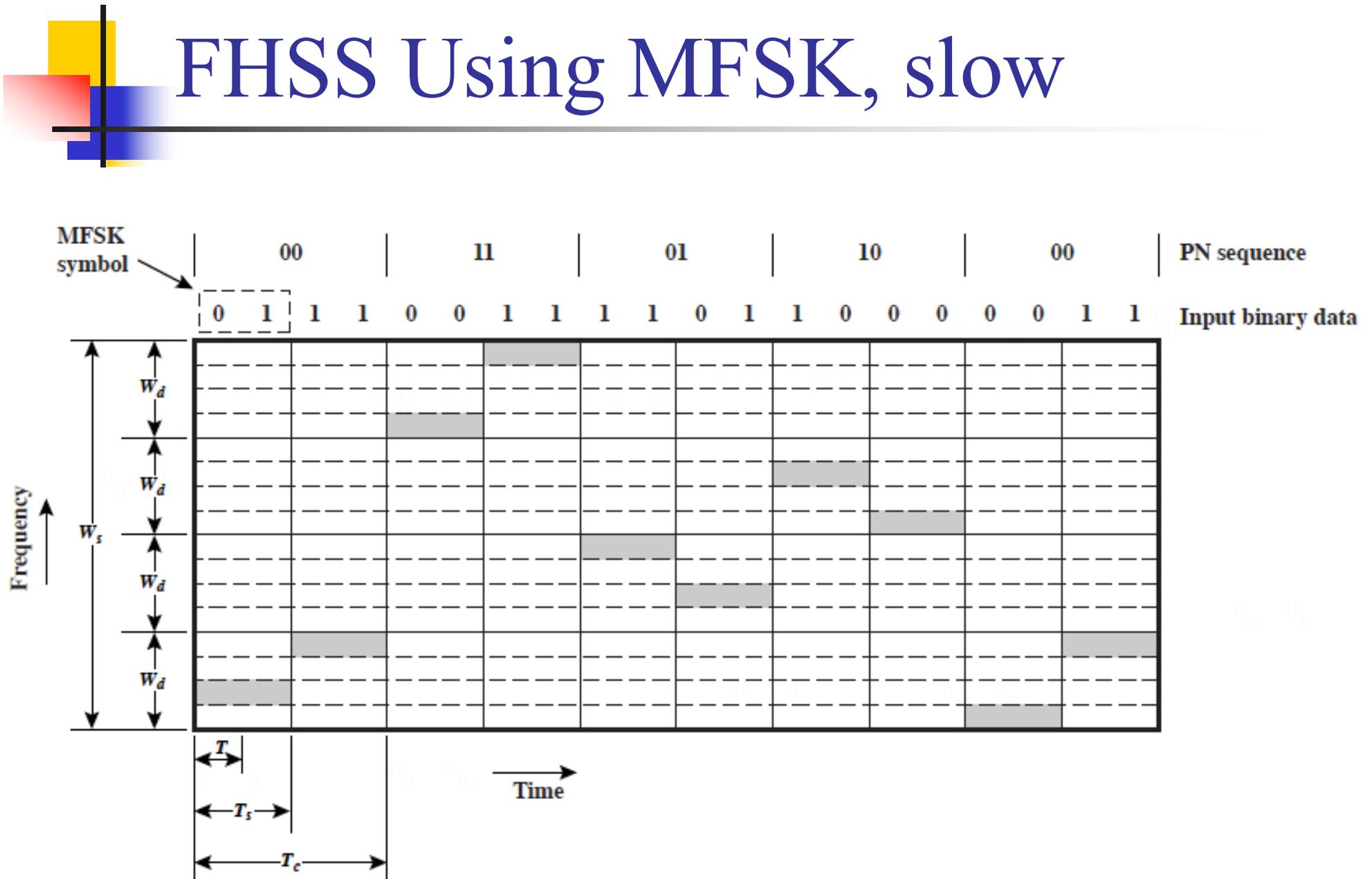
Figure 7.2 Frequency Hopping Example

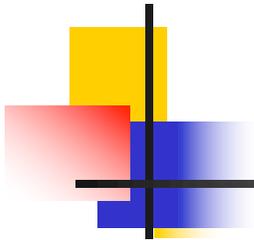


FHSS Using MFSK (1)

- 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





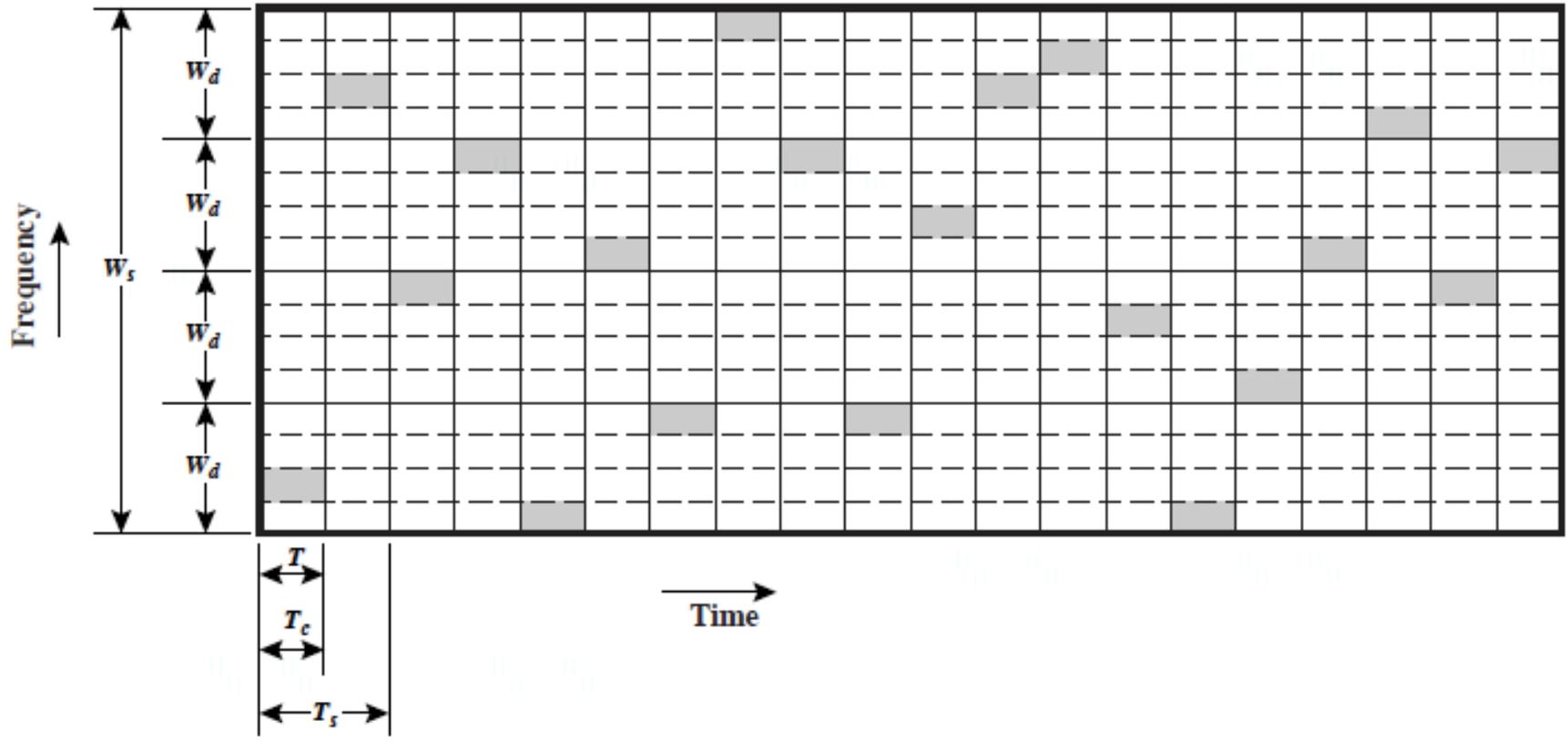
FHSS Using MFSK, fast

MFSK symbol →

00	11	01	10	00	10	00	11	10	00	10	11	11	01	00	01	10	11	01	10
0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1

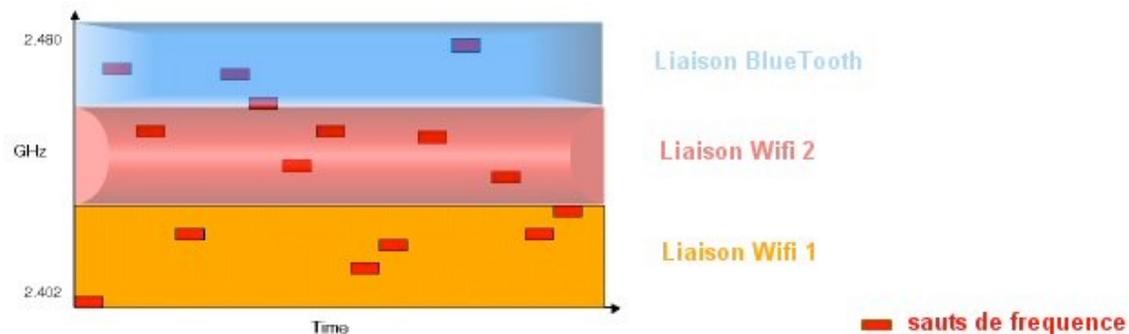
PN sequence

Input binary data



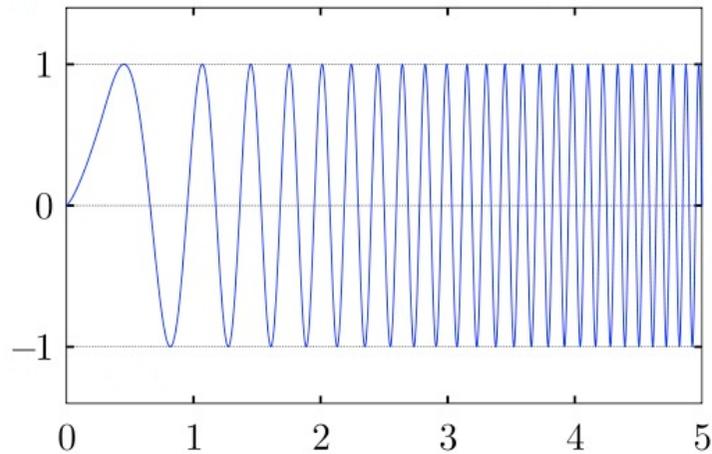
FHSS dans 802.11

- 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)

GSM

Historique GSM

- 1979 - Accord : 900 MHz pour le mobile
- 1982, Conférence Européenne des Postes et Télécommunications
 - 2 sous-bandes de 25 MHz
 - 890-915 MHz Mobile -> Réseau
 - 935-960 MHz Réseau -> Mobile
- GSM = Groupe Spécial Mobile - 13 pays Européens
France / Allemagne (tout numérique)
- 1987, transmission numérique avec multiplexage temporel à bande moyenne
- En France : France Télécom et SFR / Alcatel et Matra
- Début en 1991, ouverture commerciale en 1992

Réseau GSM

- Architecture cellulaire : limite la puissance d'émission des mobiles = allonge l'autonomie
- Ondes radio :
 - Mobile vers BS (station de base)
 - BS vers Mobile
- 2 mobiles dans une même cellule ne communiquent pas directement

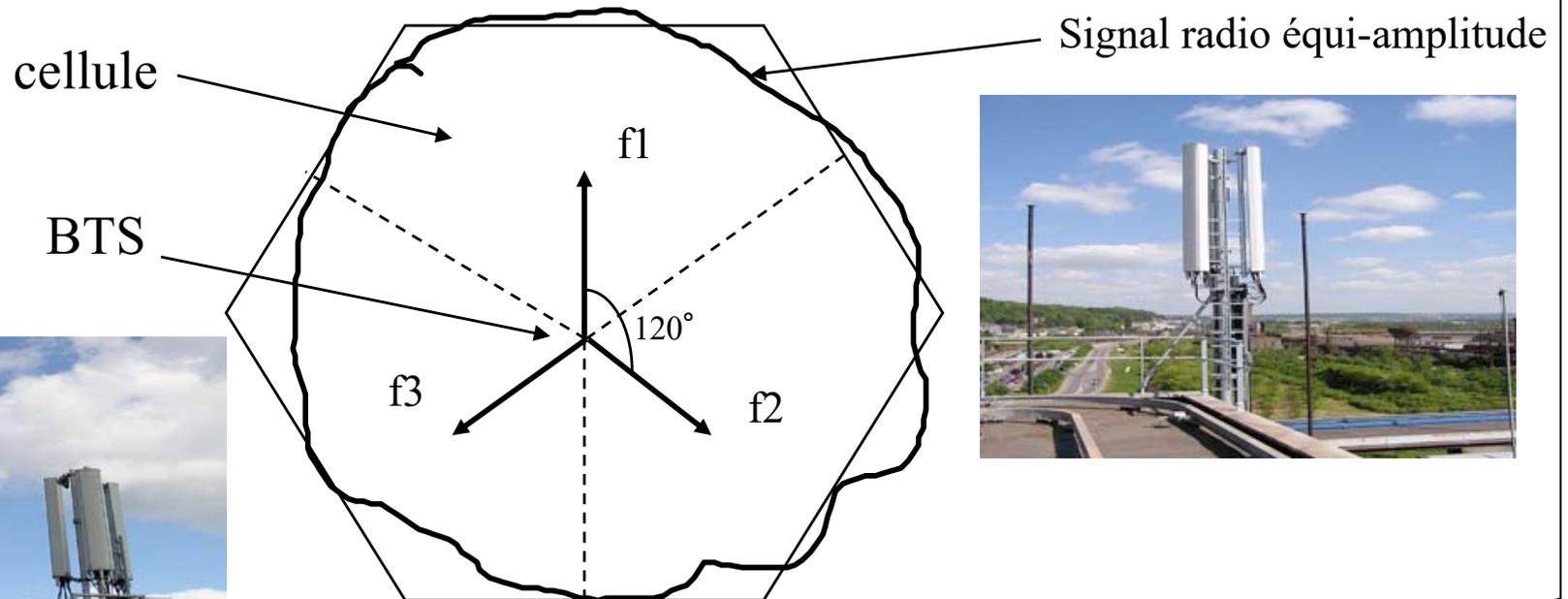
Cellule GSM

- Typiquement une cellule hexagonale avec une station de base BS (ou BTS) = tour avec antennes Base Transmitter Station
- GSM 900 MHz, distance mobile-BS = 35 kms max
macro-cellule
- DCS 1800 MHz, distance mobile-BS = 2 kms max
mini-cellule
 - puissance plus faible
 - atténuation plus importante des hautes fréquences avec la distance

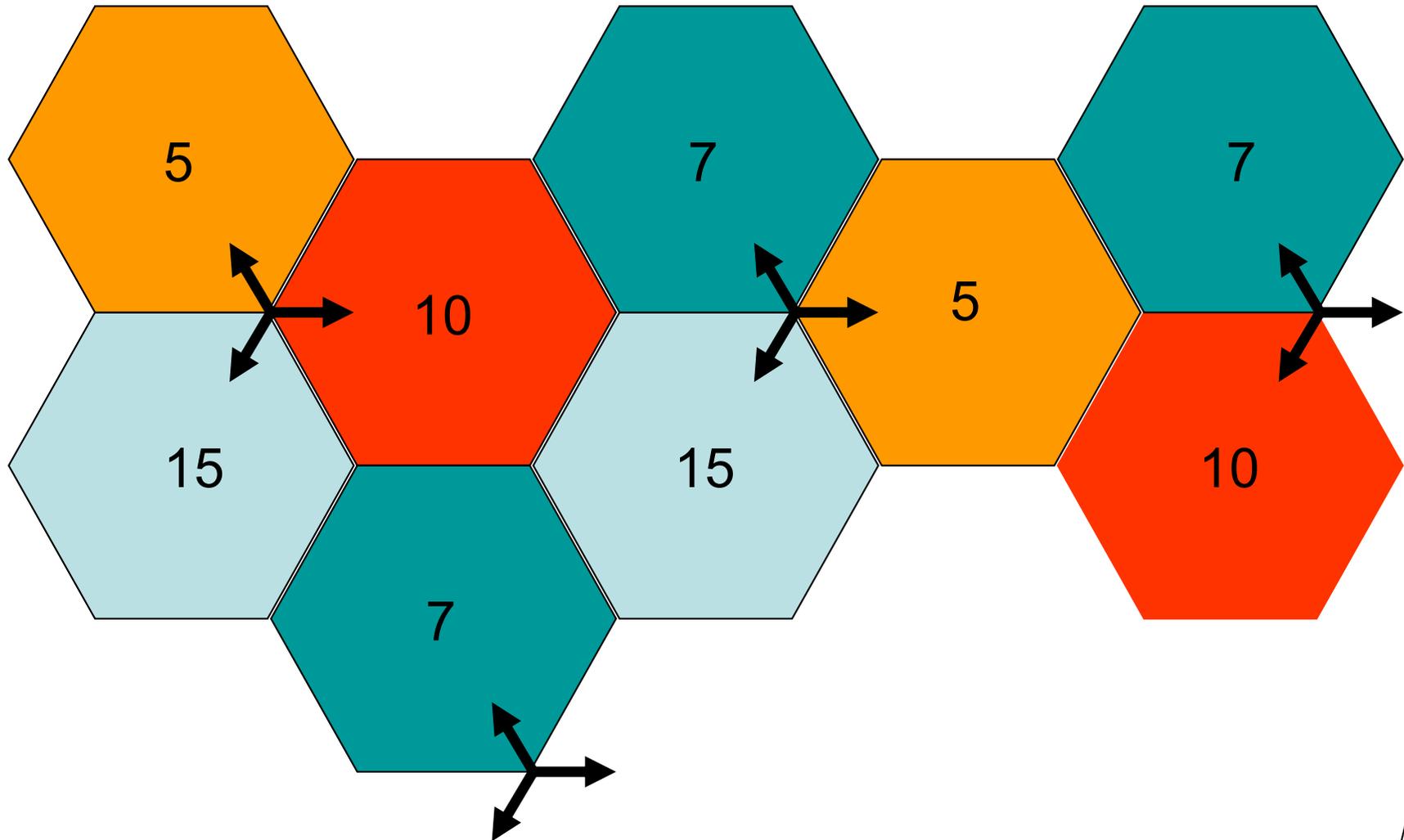
Cellule GSM

Les émetteurs sont généralement constitués de 3 antennes réparties à 120° . La répartition du signal radio équi-amplitude forme en première approximation un hexagone.

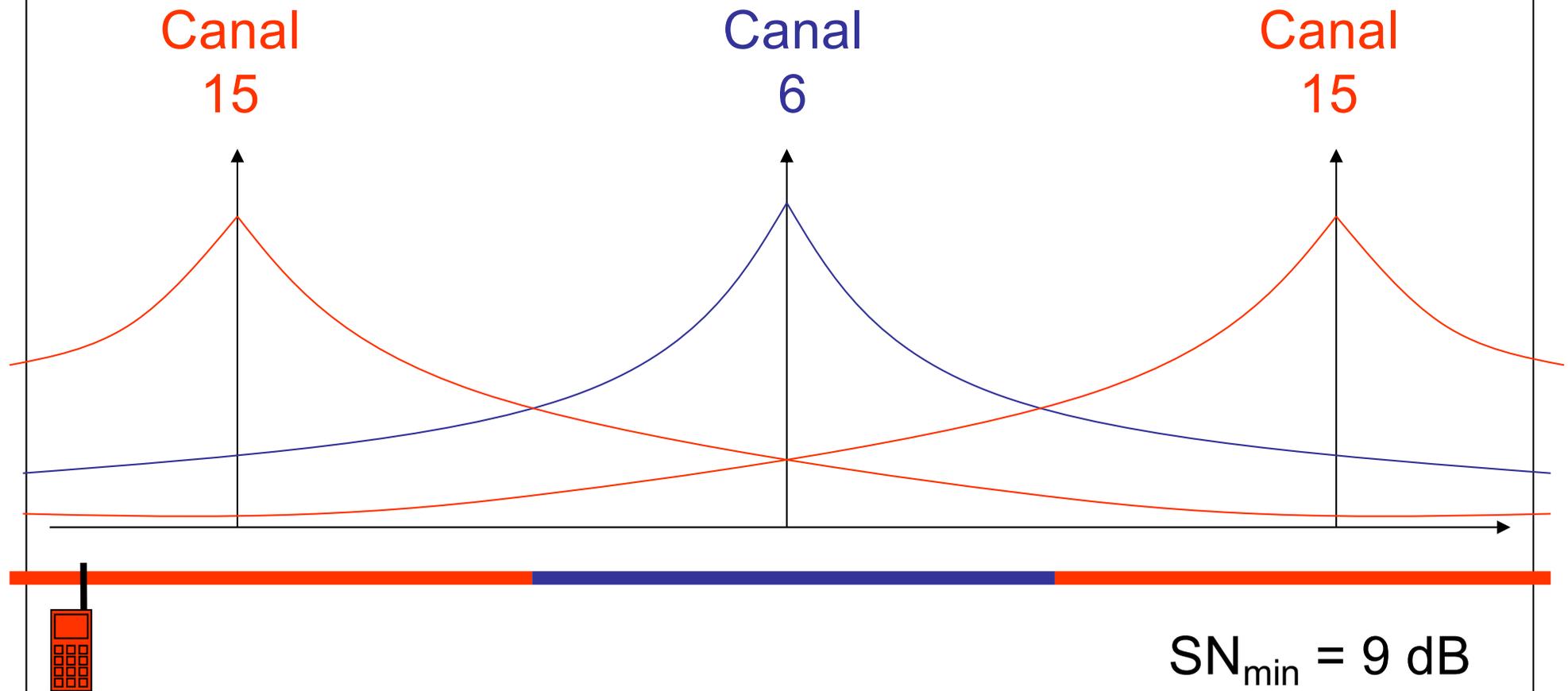
(un émetteur muni d'une seule antenne omni-directionnelle a un diagramme sensiblement équivalent).



Réutilisation des fréquences



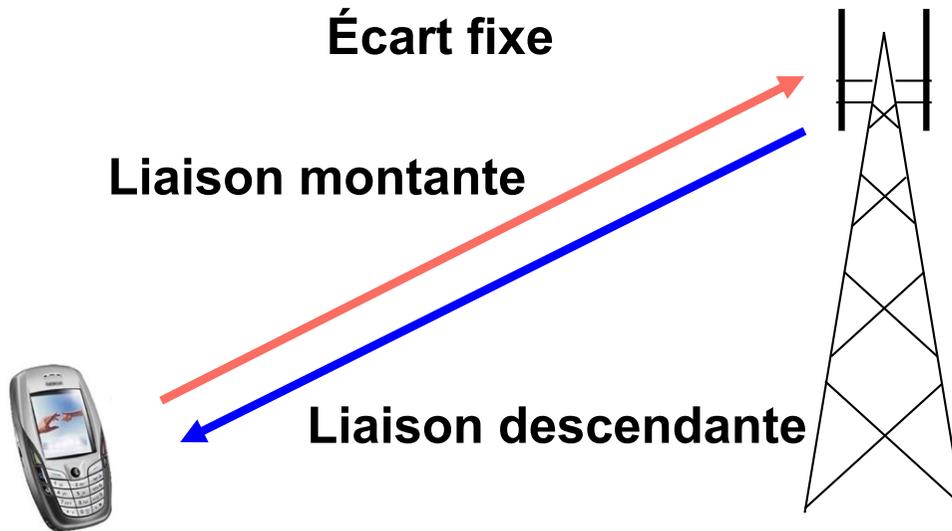
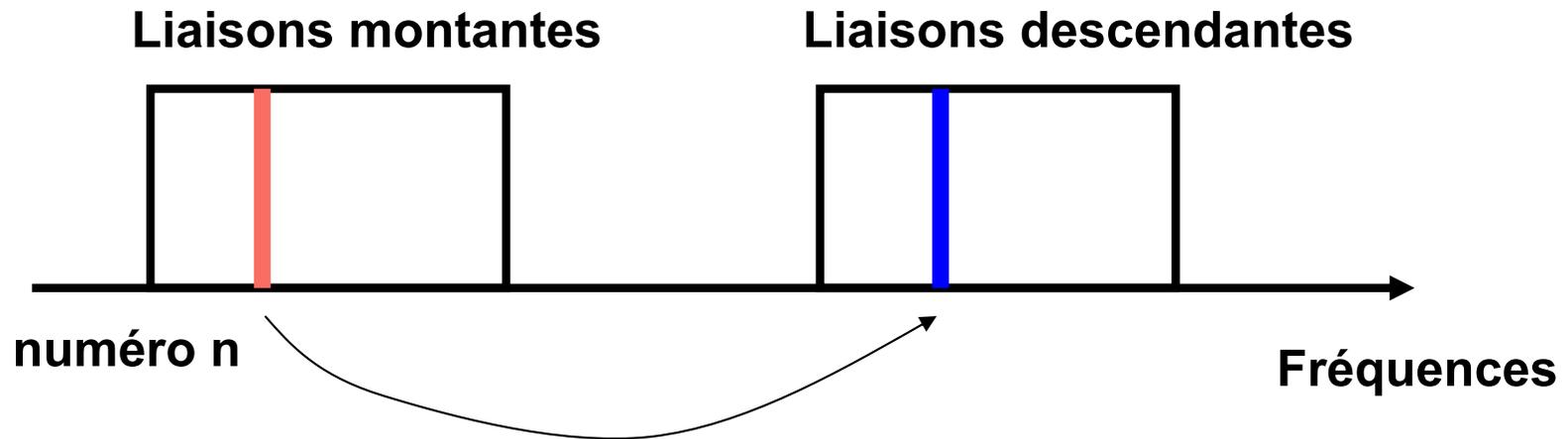
Réutilisation et interférences



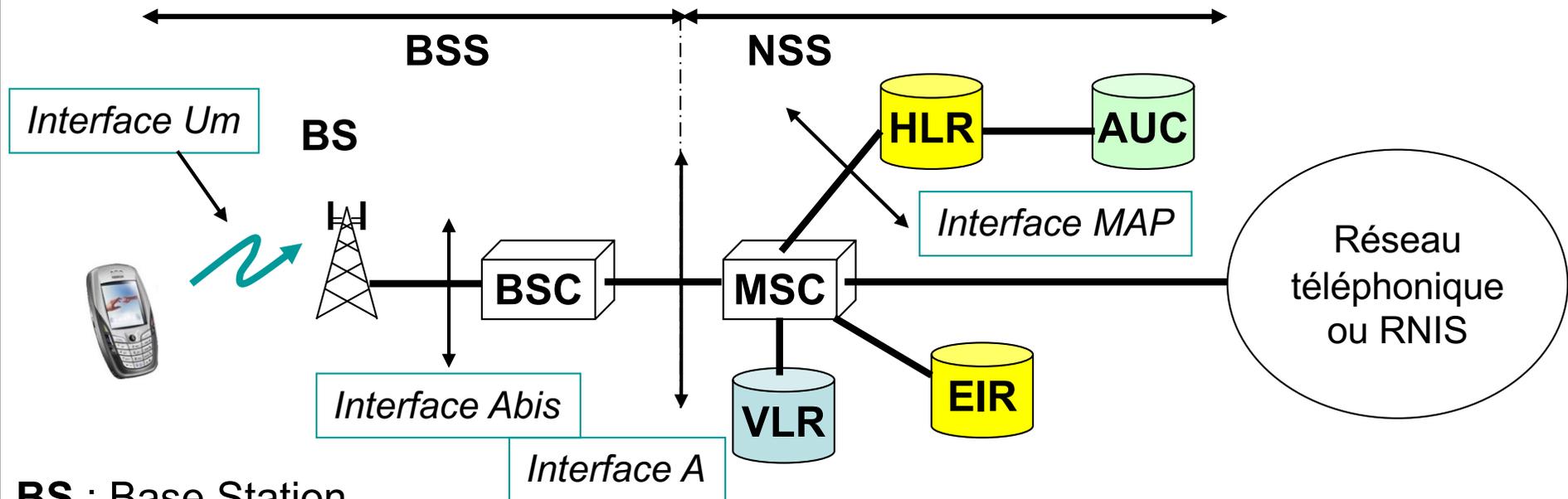
Fréquences utilisées

- Bande **EGSM** (GSM étendue) :
 - largeur 35 MHz
 - de 880 à 915 MHz Mobile → Base
 - de 925 à 960 MHz Base → Mobile
 - écart de 45 MHz
 - 174 canaux de 200KHz
- Bande **DCS** :
 - largeur 75 MHz
 - de 1710 à 1785 MHz Mobile → Base
 - de 1805 à 1880 MHz Base → Mobile
 - écart de 95 MHz
 - 374 canaux de 200KHz

Exemple



Structure du réseau



BS : Base Station

BSC : BS Controller (contrôle entre 20 et 30 BS)

BSS : BS System = interface radio (équipement physique de la cellule)

MSC : Mobile services Switching Center = commutateurs mobiles

VLR : Visitor Location Register = base d'enregistrement des visiteurs (dynamique)

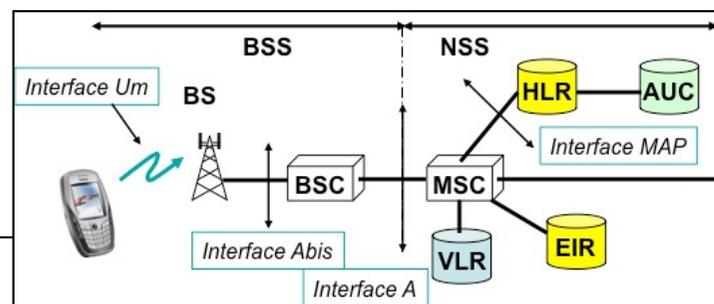
HLR : Home Location Register = BdD de localisation, caractérisation des abonnés

AUC : Authentication Center = centre d'authentification des abonnés

EIR : Equipment Identity Register = base de données des terminaux

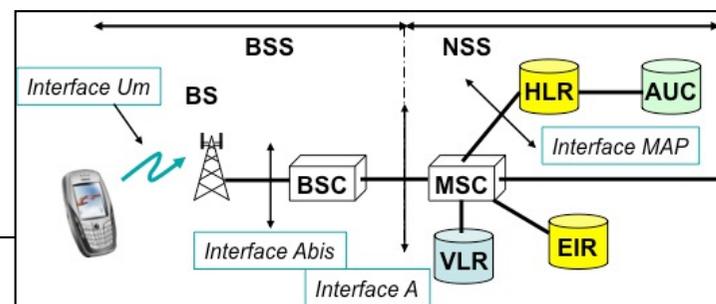
BS : Station de base

- Émetteur / récepteur (TRX)
- Modulation / démodulation, égalisation, codage, correction d'erreur
- Mesures radio (transmises au BSC)
- Un TRX = 1 porteuse = 7 communications
 - Rural BTS=1 TRX, Urbain BTS=2-4 TRX
- **BTS Standard** (2,5-32 Watt)
 - Locaux techniques
 - Antennes + câble + coupleur + 1-4 TRX
- **Micro-BTS** (0.01-0.08 Watt)
 - Zone urbaine dense
 - Équipement intégré
 - Coût faible



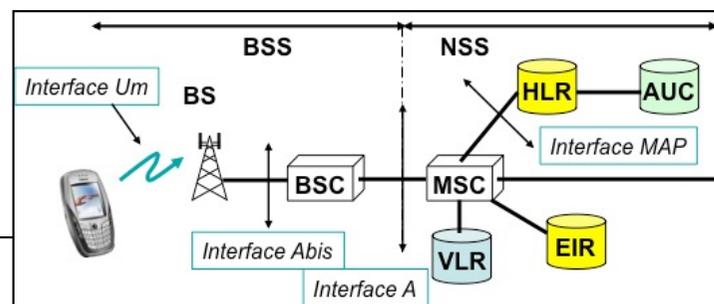
BSC : Contrôleur de stations de base

- Gère les ressources radio
 - allocation de fréquences pour les communications
 - mesures des BTS, contrôle de puissance des mobiles et BTS
 - décision et exécution des handovers
- Rôle de commutateur, plusieurs dizaines de BSC à Paris



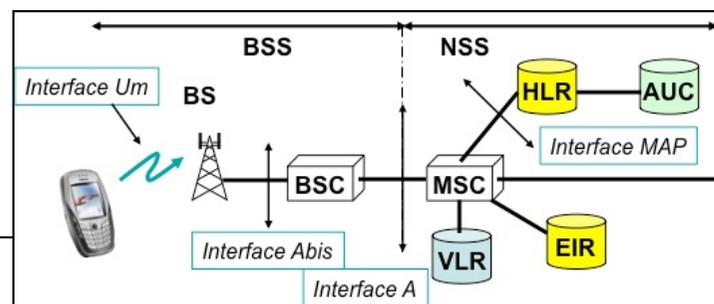
HLR

- Mémorise les caractéristiques d'un abonné
 - **IMEI** - *International Identification Equipment Identity* : numéro unique dans le mobile lors de sa fabrication
 - Numéro d'abonné
 - IMSI** - *International Mobile Subscriber Identity*
se trouve dans la carte
 - SIM** - *Subscriber Identity Module*
 - Profil d'abonnement
- Mémorise le **VLR** où l'abonné est connecté (même à l'étranger) pour permettre l'acheminement éventuel d'un appel entrant



MSC, VLR et EIR

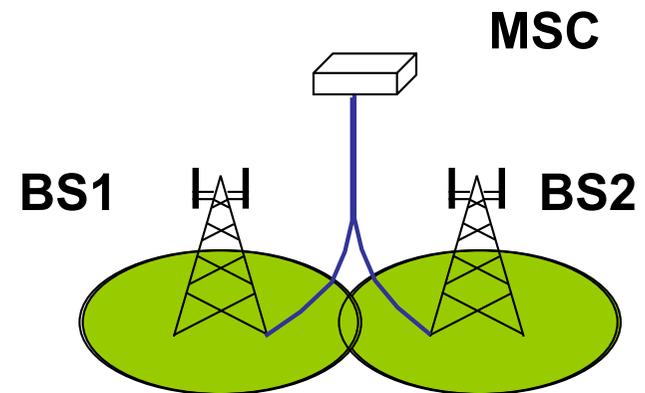
- MSC : Commutateur de services mobiles
- Communication mobile vers autre MSC
- Handover si hors BSC
- Gère le VLR pour la mobilité des usagers (identité temporaire)
- Fonction de passerelle avec RTC
- VLR : stocke dynamiquement les informations des abonnés liées à leur mobilité
- EIR : Equipment Identity Register = identité des terminaux, contrôle d'homologation, déclaration de vol, etc.



Mécanisme de "Handover"

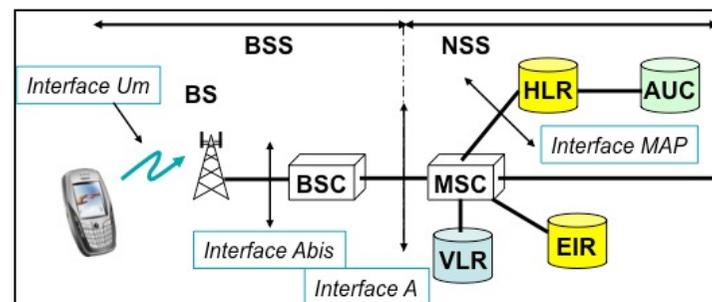
- Exemple GSM
 - la qualité du lien est mesuré périodiquement
 - en cas de problème, la BS envoie une alarme vers le MSC
 - le MSC cherche une nouvelle cellule ou un nouveau canal
 - le MSC déclenche ensuite le handover si c'est possible (l'ancien canal est alors libéré), sinon la communication continue

MSC : Mobile Switching Center/Controller
BS : Base Station



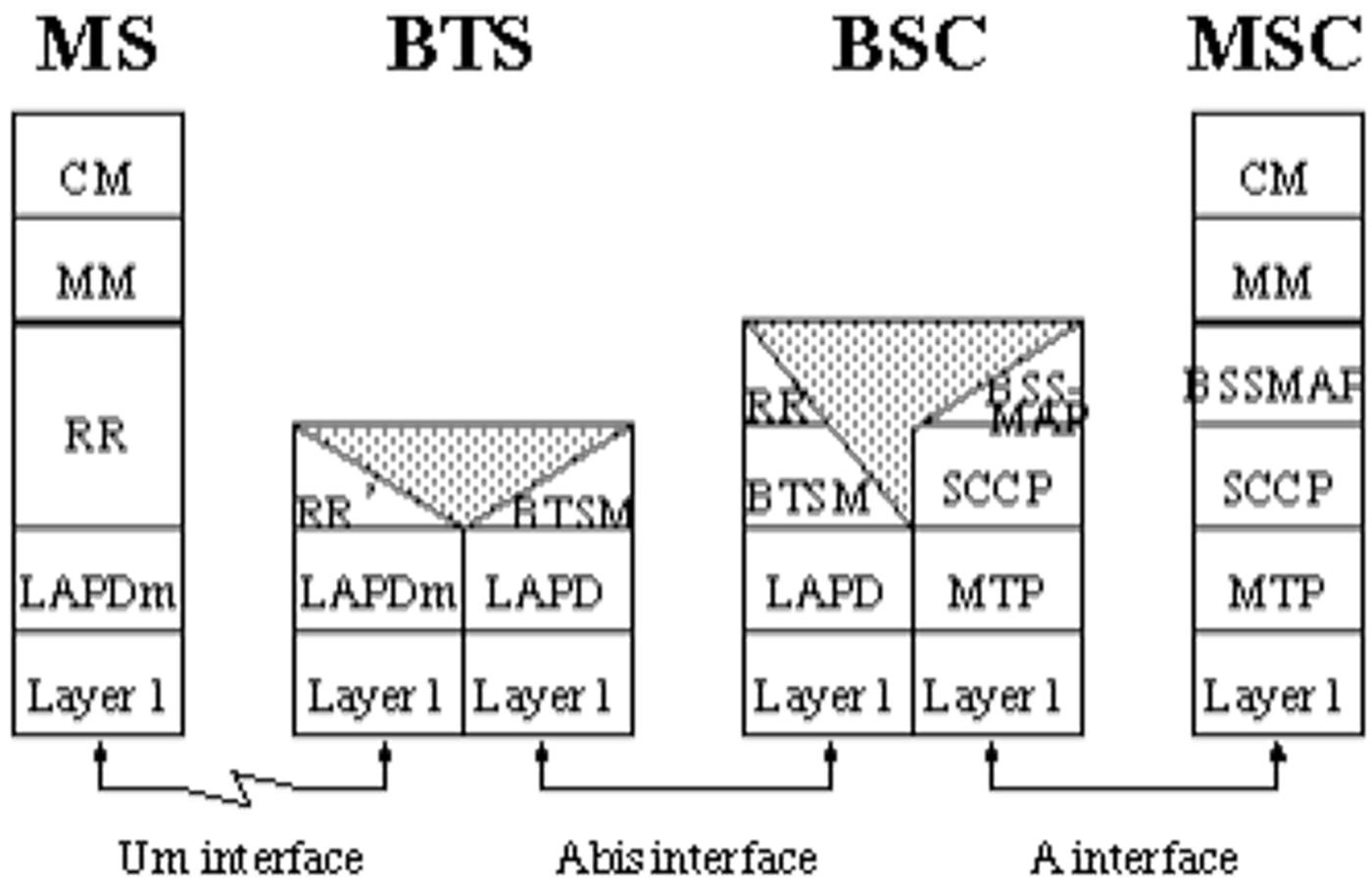
BSS – sous-système radio

- Couche 1 physique
- Couche 2 liaison de données
 - fiabilisation de la transmission (protocole)
- Couche 3 réseau
 - gestion des circuits commutés
 - Radio Ressource (RR)
 - gestion des canaux logiques
 - surveillance des balises
 - Mobility Management (MM)
 - localisation/authentification/allocation identité temporaire
 - Connection Management (CM)
 - Call Control, Short Message Service, Supplementary Services



INFO

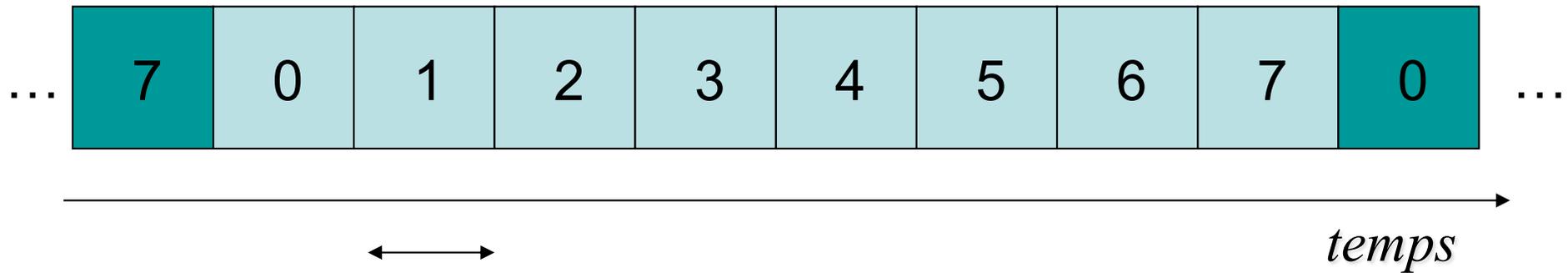
Interfaces et protocoles



Multiplexage temporel : TDMA

8 Time Slots par canal

Durée d'une trame TDMA = 4.62 ms



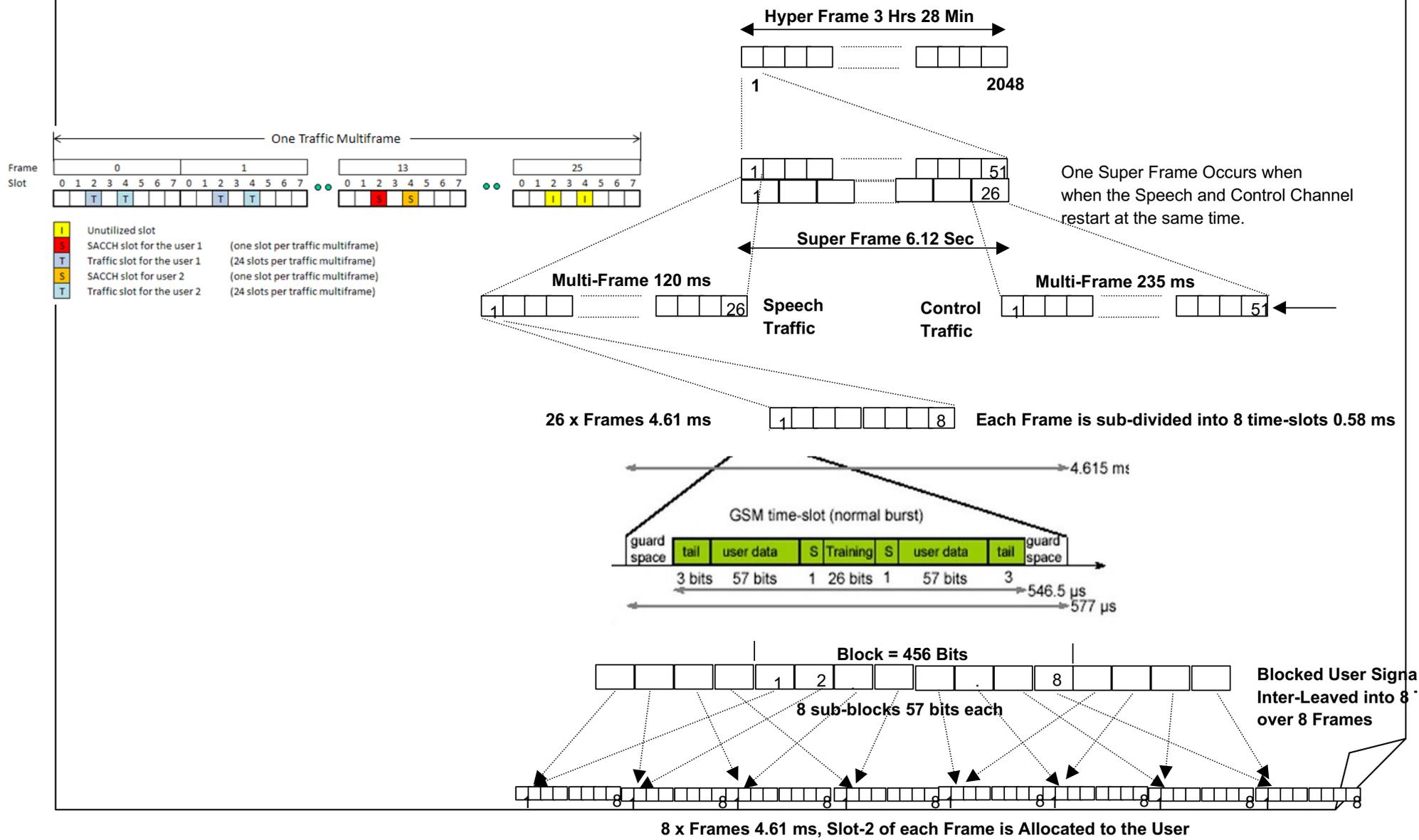
$7500 \times 1/13 \text{ MHz} = \mathbf{577 \mu s}$
(7500 périodes de Quartz de mobile)

156.25 bit

270 kbps

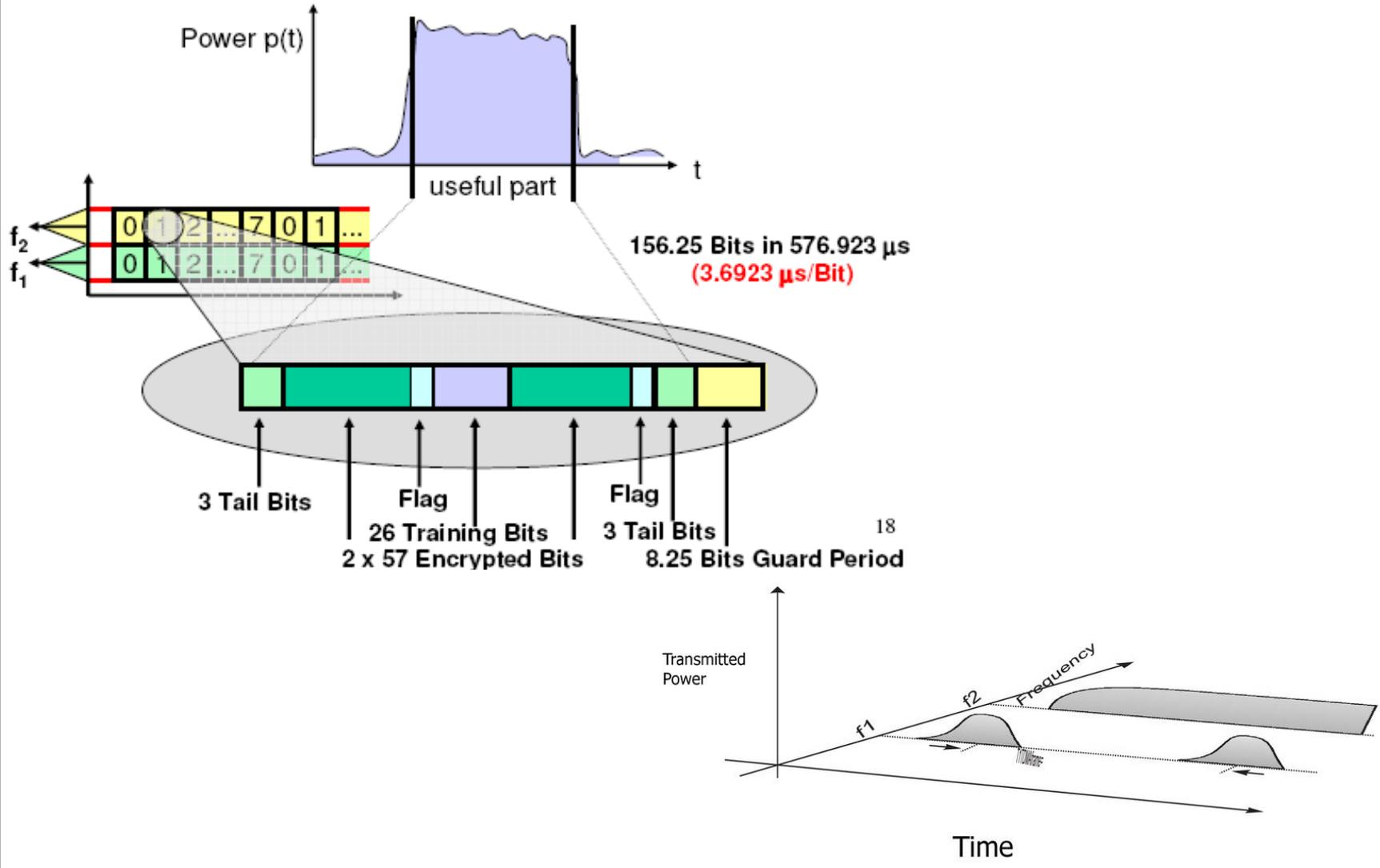
INFO

Frame hierarchy (1)

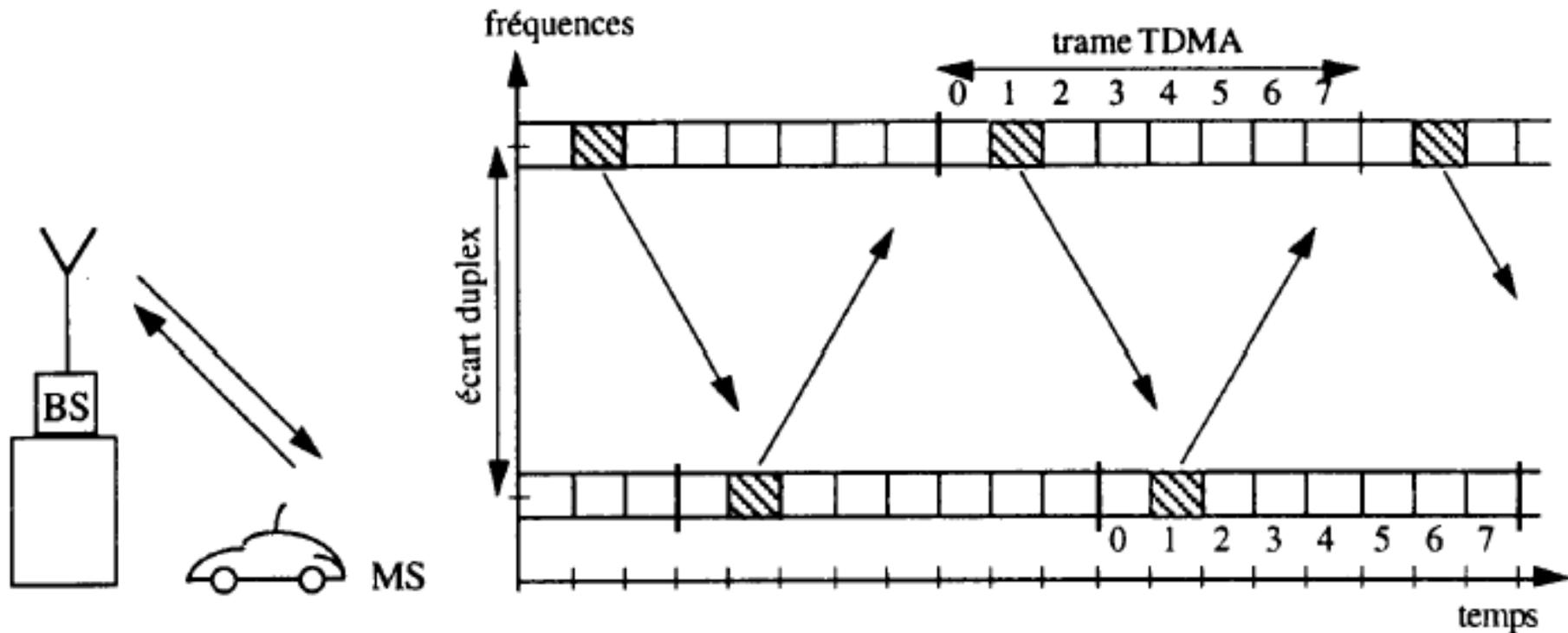


INFO

Frame hierarchy (2)

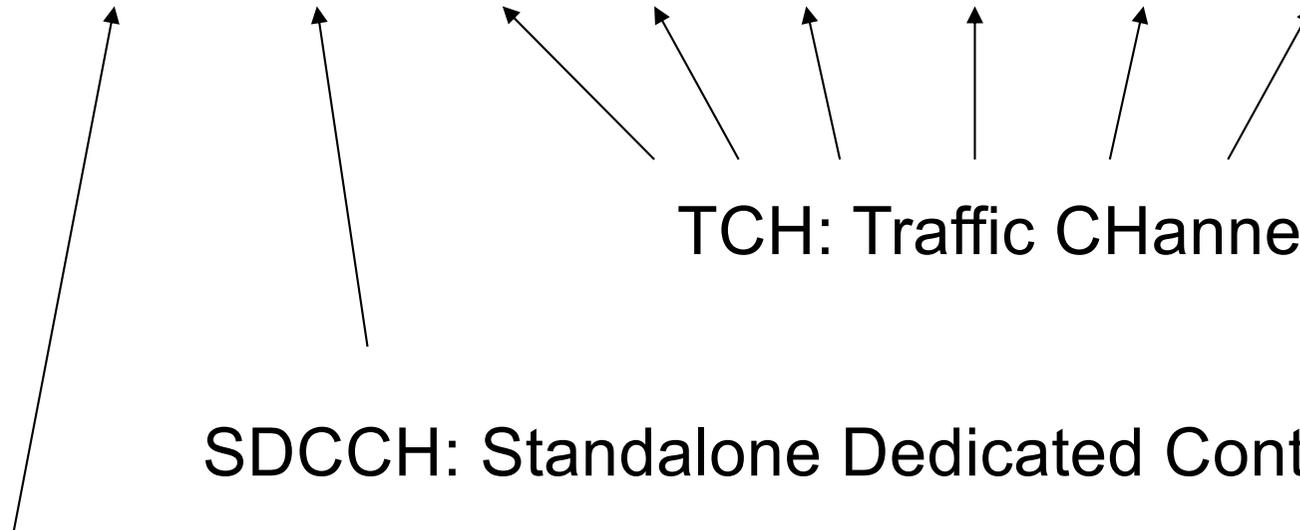
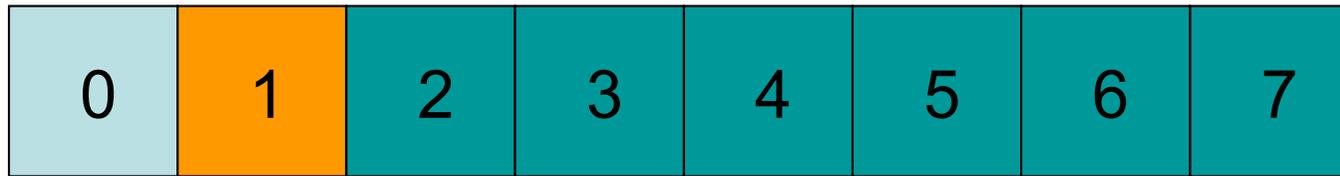


Multiplexage temporel : TDMA



- Réception puis émission 3 time-slots après (1,7ms) pour le mobile :
- évite la simultanéité des traitements
 - la synchronisation elle-même est décalée

Canaux logiques



TCH: Traffic CHannel

SDCCH: Standalone Dedicated Control CHannel

BCCH: Broadcast Control CHannel

Voie balise et voie trafic

- Chaque station de base émet en permanence des informations sur sa voie balise (BCH = Broadcast Channel)
- Un mobile en veille échange avec sa BS des signaux de contrôle (émission en slot 0 à f, réception en slot 0 à f+écart)
- Le niveau de la voie balise (BCH) est connu pour :
 - à la mise en route, chercher le niveau le + élevé pour se connecter à une BS
 - émettre des infos opérateurs et fréquences des cellules voisines
 - messages affichés sur l'écran du mobile

Voie balise et voie trafic

Mobile en veille :

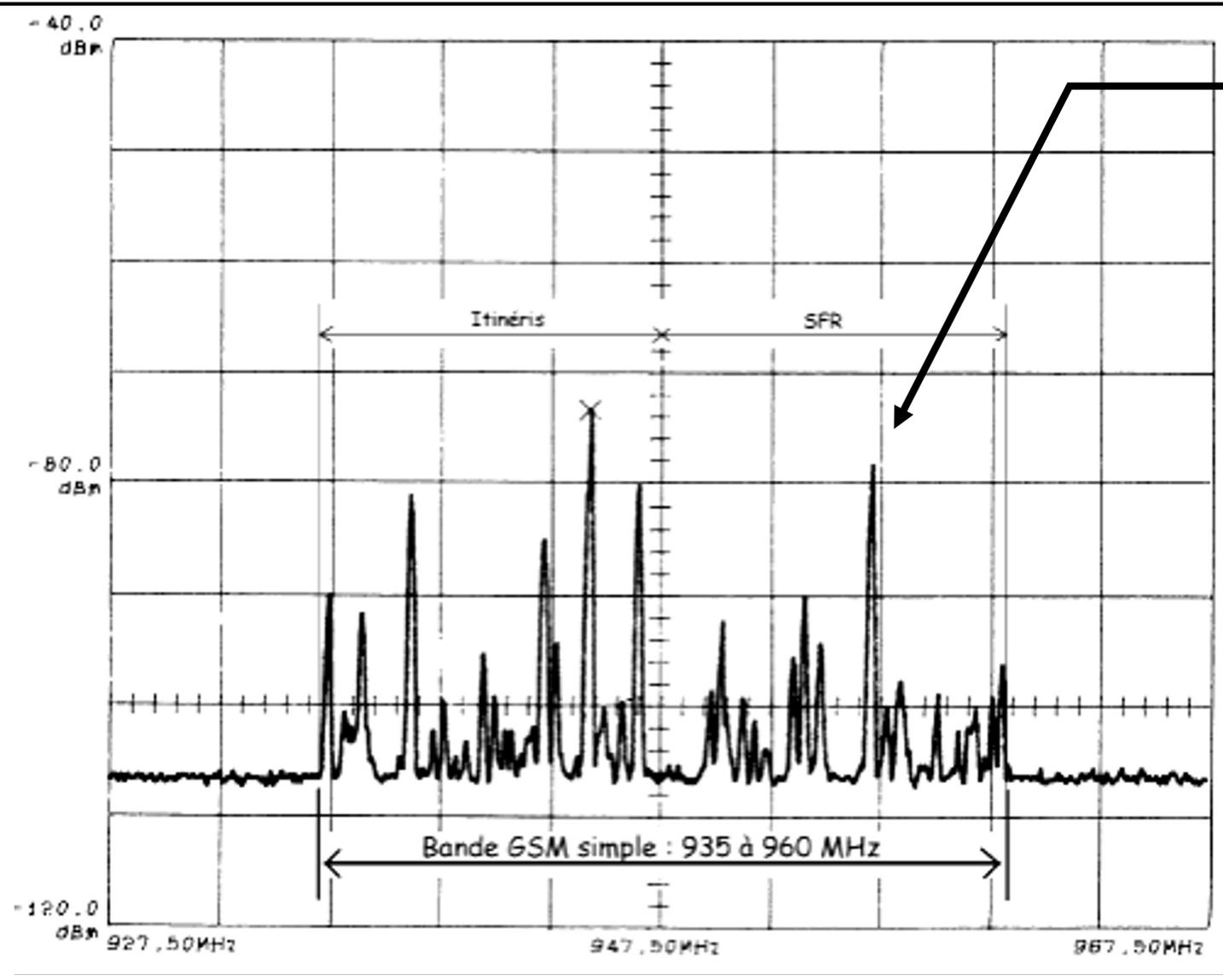
- Un récepteur écoute les BCH des cellules voisines toutes les 5s si le signal reçu est faible, toutes les 15s si le signal est fort
- La liaison montante est utilisée pour des demandes de connexion (RACH)

Mobile en communication :

- Échange des signaux de parole et de contrôle sur la voie TCH (émission en slot i à f , réception en slot i à f +écart)
- Écoute des voies balises pour un éventuel changement de cellule

INFO

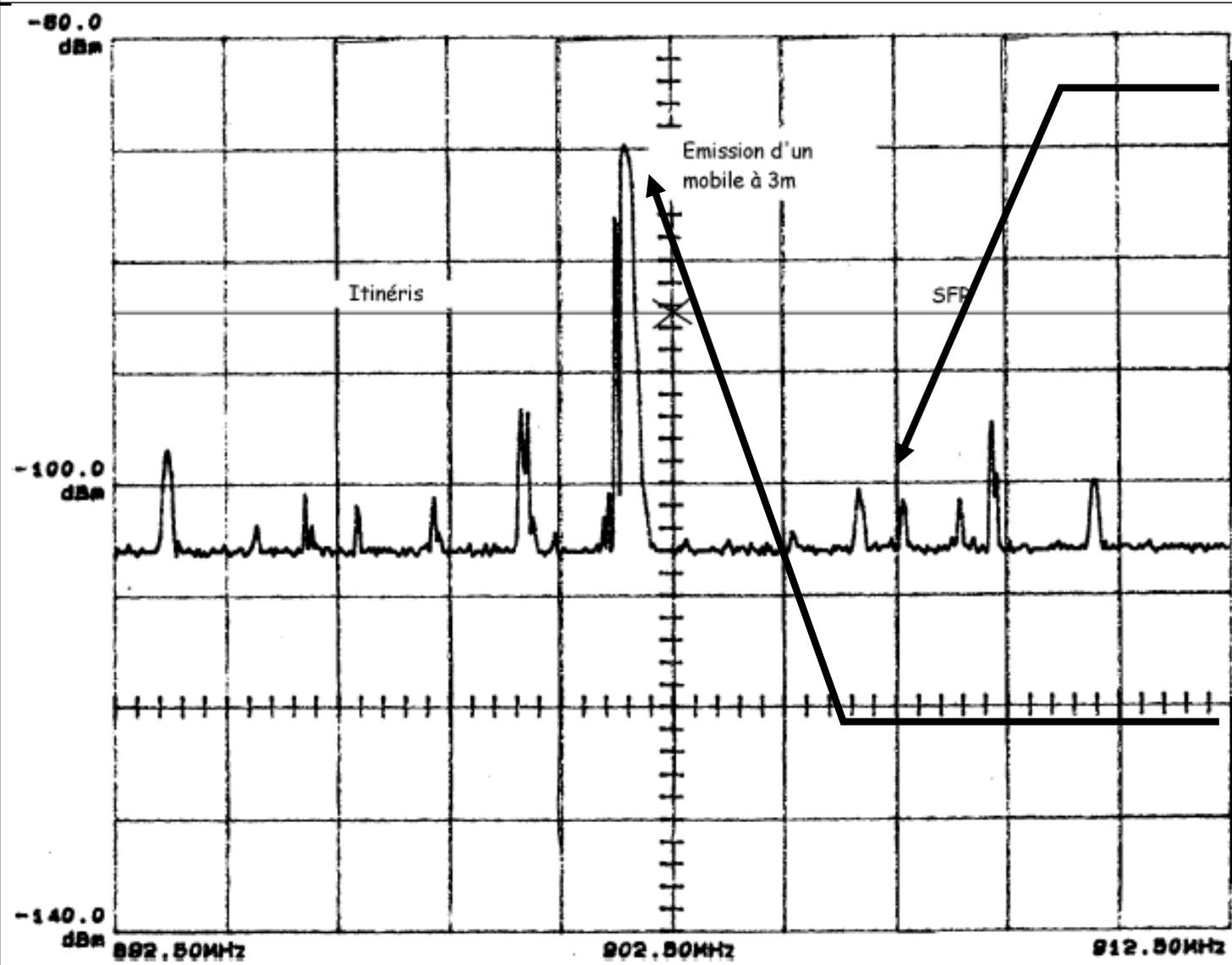
Spectre de la bande GSM descendante



Voie balise de la cellule la plus forte pour un opérateur

INFO

Spectre de la bande GSM montante



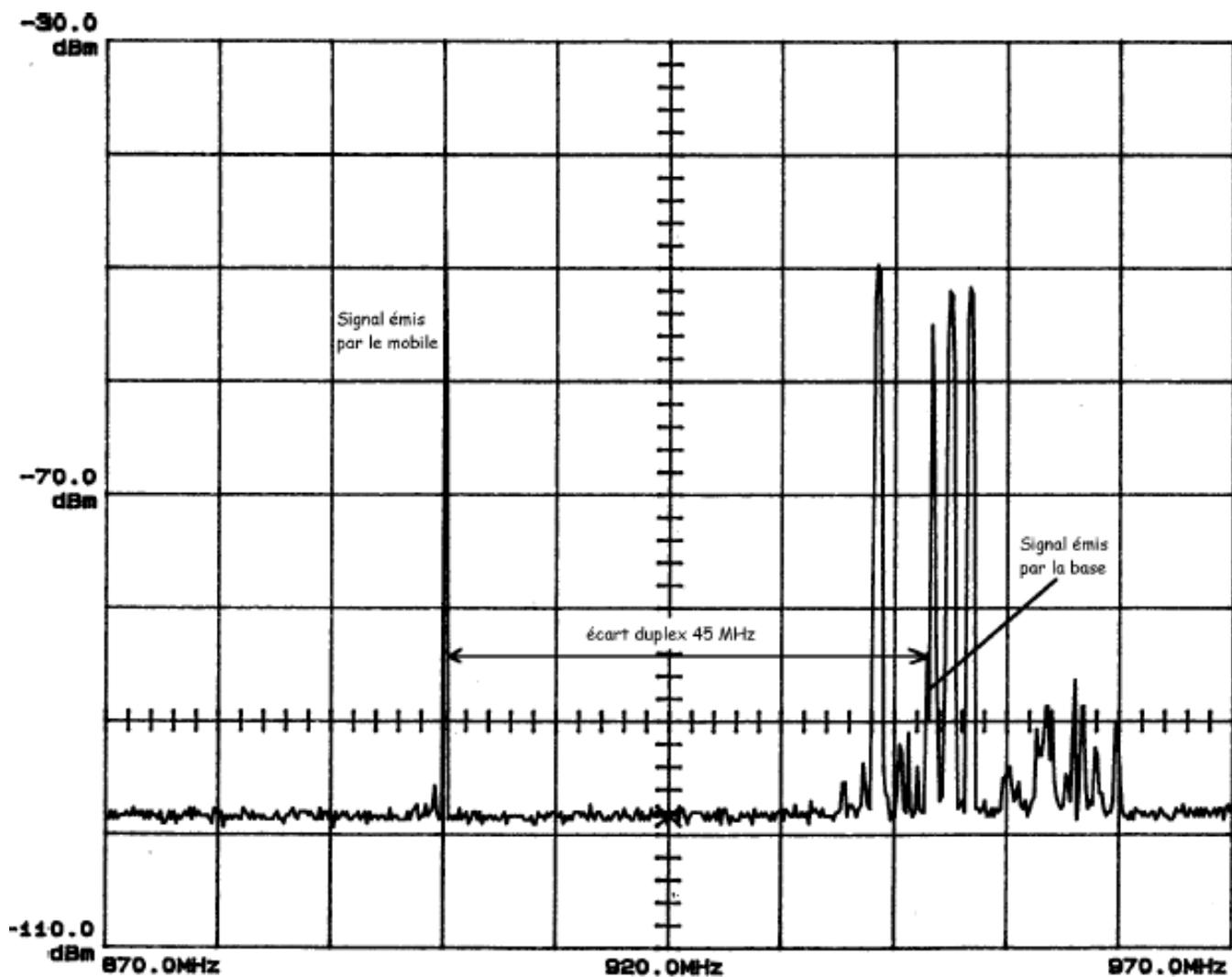
Pics :
correspondent à
l'allumage des
mobiles

Superposition de
2h
d'enregistrement

Communication
proche de
l'enregistreur

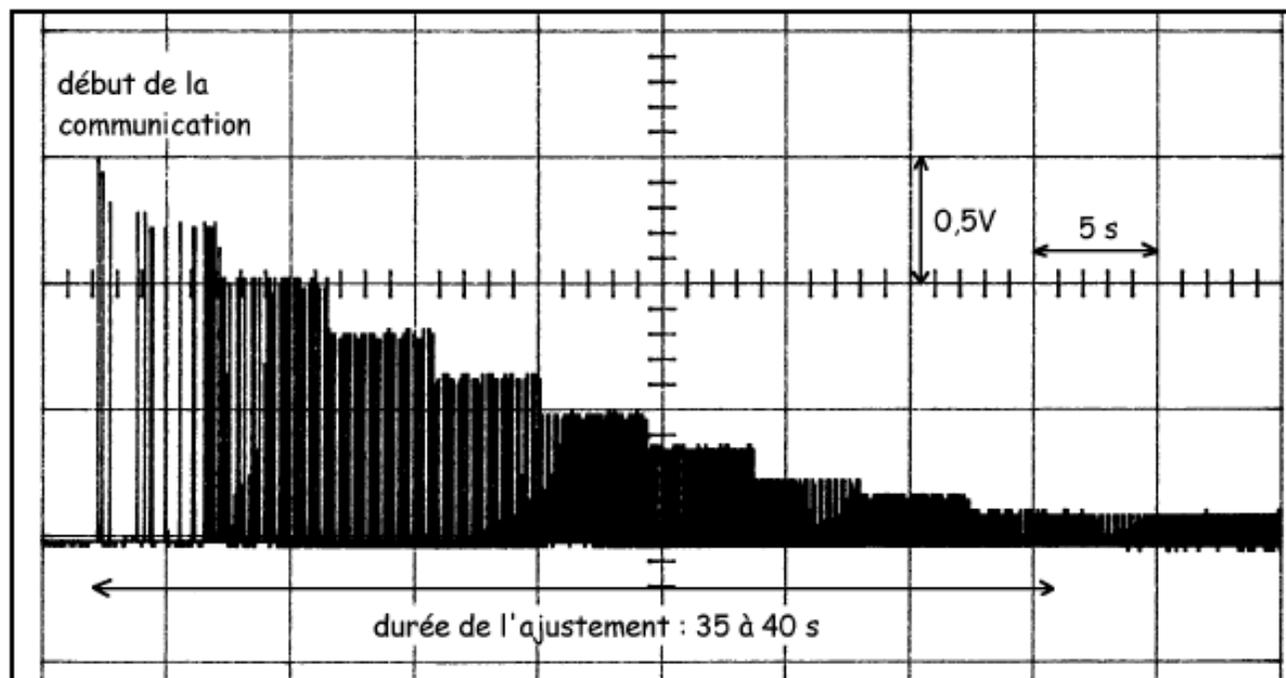
INFO

Spectres de la bande montante et descendante pendant une conversation

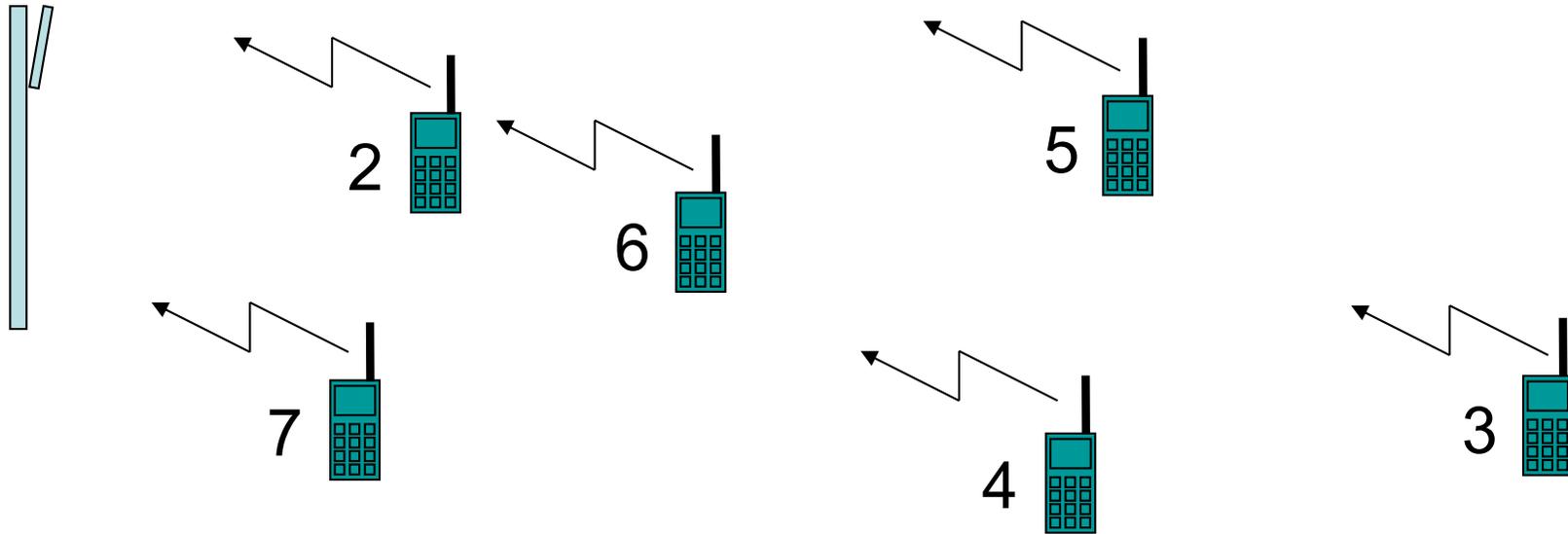


Contrôle de puissance d'émission

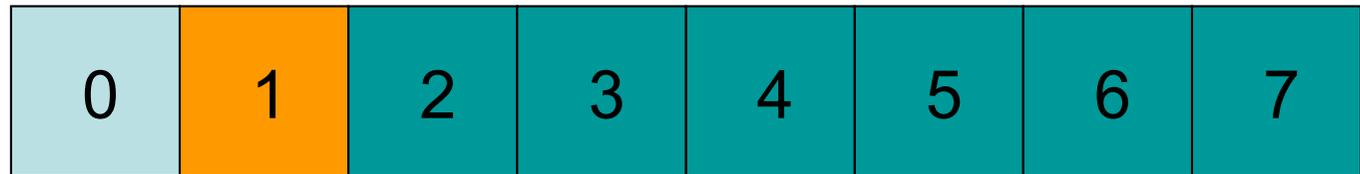
- La station de base contrôle de nombreux paramètres du mobile dont la puissance d'émission :
 - minimisation de $P_{\text{émis}}$ tout en conservant la QoS
 - diminution des interférences
 - augmentation de l'autonomie



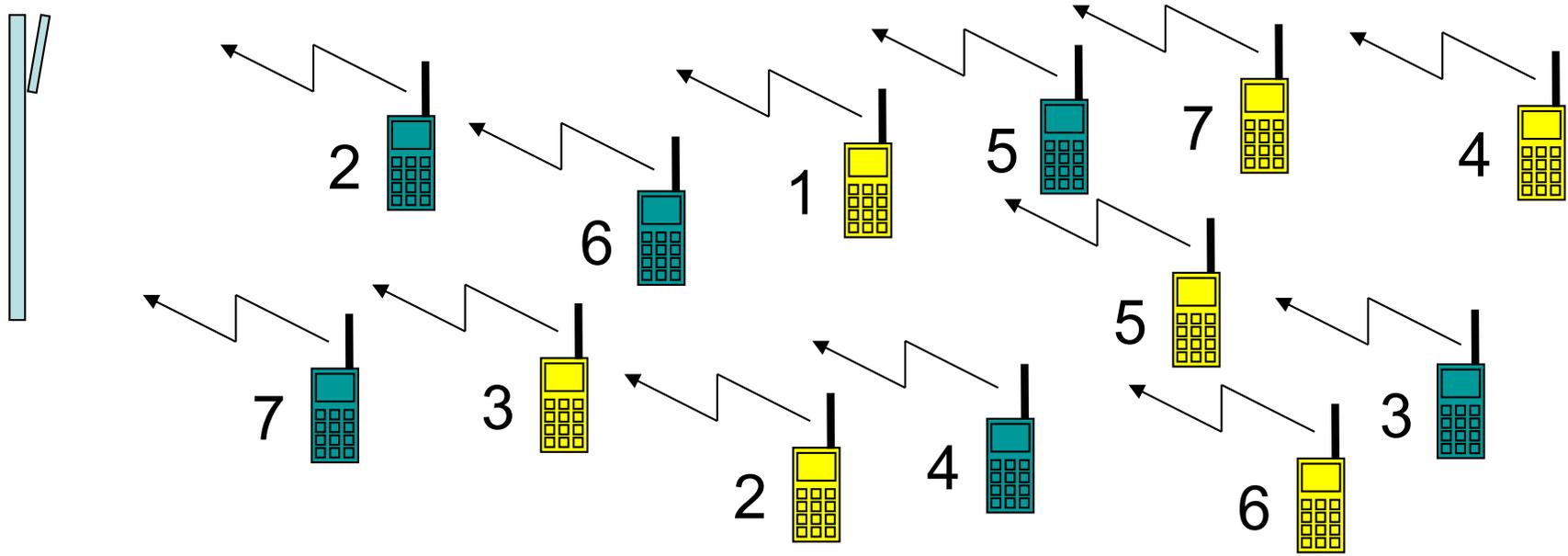
Trafic / Capacité (1/2)



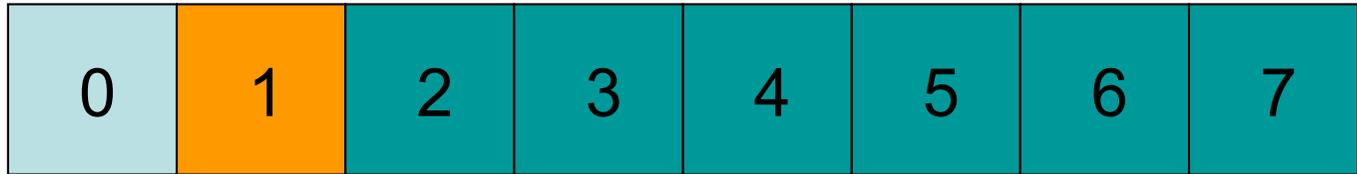
Canal 5



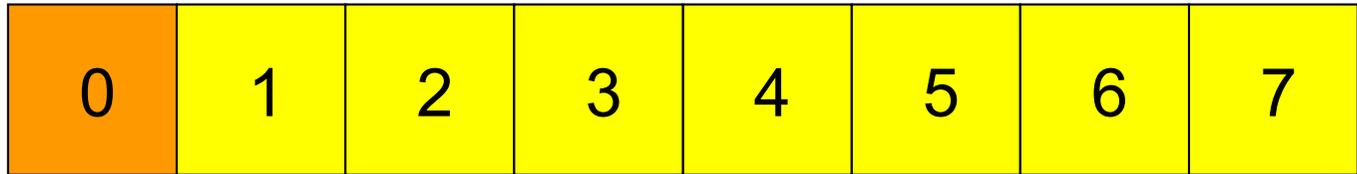
Trafic / Capacité (2/2)



Canal 5



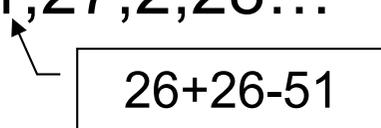
Canal 18



Changement de cellule

- Lors d'une conversation, le mobile écoute les BCH des cellules voisines. L'écoute se fait entre l'émission et la réception du *burst* suivant : mesure de niveau (peu de temps)
- Pour décoder les informations, le mobile s'arrête d'émettre et de recevoir toutes les 26 trames (slot *idle*): le mobile écoute et décode la voie balise de l'une des cellules voisines. Quant à la station de base, elle émet les informations toutes les 51 trames.
51 et 26 étant premiers entre eux, toutes les voies balises seront décodées:

Trames décodées : 0,26,1,27,2,28...


$$26+26-51$$

Mobile en fonctionnement

A la **mise sous tension** se passent les opérations suivantes :

- l'utilisateur valide sa carte SIM en tapant au clavier son numéro de code PIN (Personal Identity Number)
- le récepteur du GSM scrute les canaux de la bande GSM et mesure le niveau reçu sur chaque canal
- le mobile repère le canal BCCH parmi les signaux les plus forts
- le mobile récupère les informations concernant le FCCH. Ce signal lui permet de se caler précisément sur les canaux GSM
- le mobile récupère le signal de synchronisation de la trame TDMA diffusé sur le BCCH et synchronise sa trame
- le mobile lit sur le BCCH les infos concernant la cellule et le réseau et transmet à la BTS l'identification de l'appelant pour la mise à jour de la localisation

Le mobile a alors achevé la phase de mise en route et se met en mode veille, mode dans lequel il effectue un certain nombre d'opérations de routine :

- lecture du PCH (Paging channel) qui indique un appel éventuel
- lecture des canaux de signalisation des cellules voisines
- mesure du niveau des BCH des cellules voisines pour la mise en route éventuelle d'une procédure de handover

Mobile en fonctionnement

A la **réception** d'un appel :

- l'abonné filaire compose le n° de l'abonné mobile: 06 XX XX XX XX
- l'appel est aiguillé sur le MSC le plus proche qui recherche l'IMSI dans le HLR et la localisation du mobile dans le VLR
- le MSC le plus proche du mobile (Visited MSC : fait diffuser dans la zone de localisation, couvrant plusieurs cellules, un message à l'attention du mobile demandé par le PCH)
- le mobile concerné émet des données sur RACH avec un Timing Advance fixé à 0 et un niveau de puissance fixé par le réseau (ces paramètres seront ajustés ultérieurement)
- le réseau autorise l'accès par le AGCH et affecte au mobile une fréquence et un time-slot
- l'appelé est identifié grâce à la carte SIM
- le mobile reçoit la commande de sonnerie
- décrochage de l'abonné et établissement de la communication

Mobile en fonctionnement

Lors de l' **émission** d' un appel

- l' abonné mobile compose le numéro du correspondant du réseau téléphonique commuté
- la demande arrive à la BTS de sa cellule
- elle traverse le BSC pour aboutir dans le commutateur du réseau MSC
- l' appelant est identifié et son droit d' usage vérifié
- l' appel est transmis vers le réseau public
- le BSC demande l' allocation d' un canal pour la future communication
- décrochage du correspondant et établissement de la communication

Localisation - itinérance

- Lors d'un appel entrant, pour contacter un mobile :
 - on envoie un message de recherche (paging)
 - dans la dernière cellule auquel le mobile s'est enregistré
 - dans tout le réseau (inondation)
 - recherche avec les bases de données
 - centralisées
 - décentralisées
 - hybrides

GPRS

GPRS

- **GPRS** (General Packet Radio Service) : transfert de données par paquet sur GSM (modulation GMSK) vers Internet et réseaux X25 : jusqu'à 171 kbit/s (suivant le codage de canal CS-1 à CS-4)

Codage de canal	Débit Utile	Protection
CS-1	9,05 kbit/s	++
CS-2	13,4 kbit/s	+
CS-3	15,6 kbit/s	-
CS-4	21,4 kbit/s	-- (aucune protection)

Facturé au débit - MMS

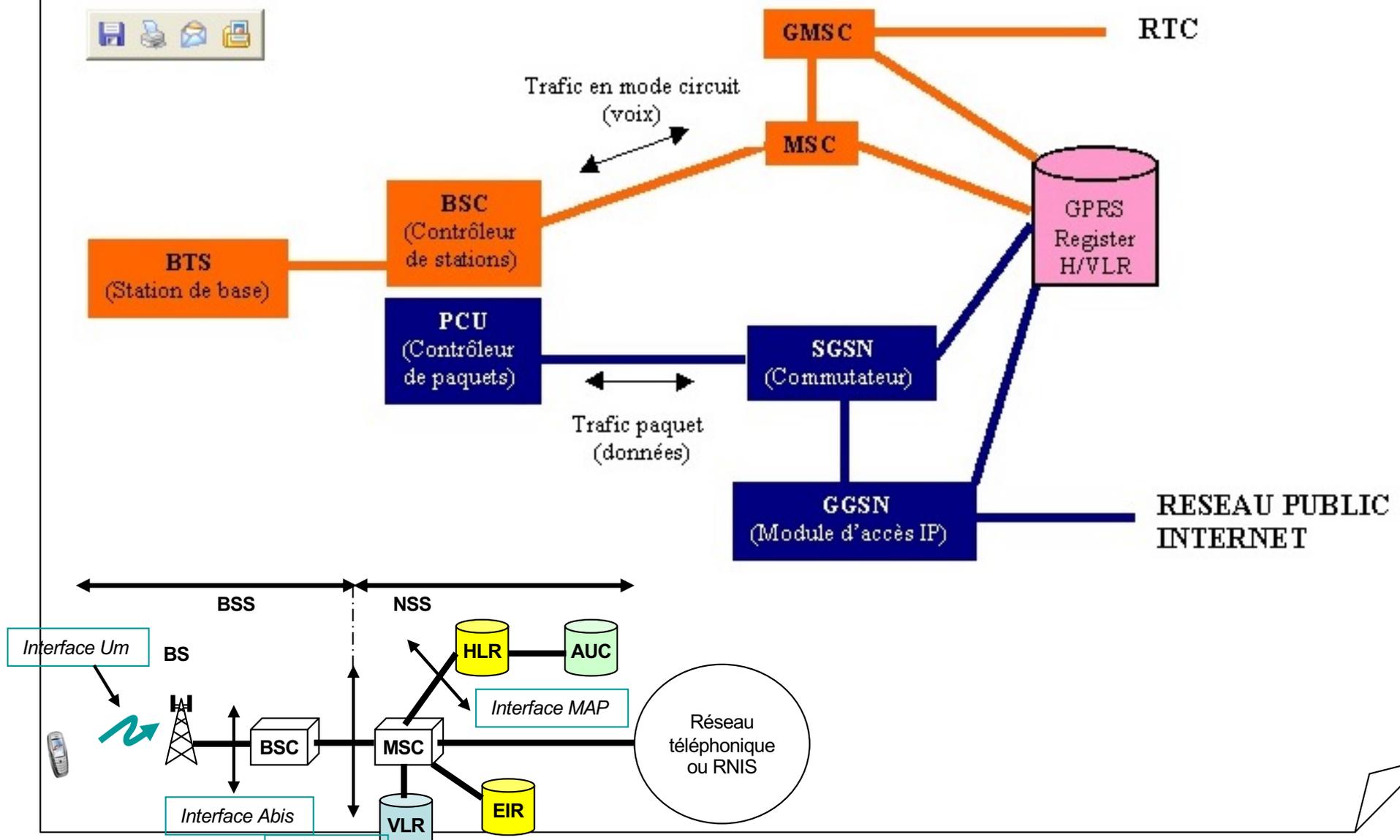
GPRS

- Échange de données en mode paquets :
 - découper l'information et transmettre les données par paquet lorsque les canaux ne sont pas utilisés pour la phonie
 - optimise les ressources radio par gestion de priorité, mise en attente et affectation de ressources radio uniquement en cas de transfert
- Un canal radio peut être utilisé par plusieurs utilisateurs. Les Time Slots sont partagés => moins de blocage.
- Un utilisateur peut utiliser plusieurs canaux radio. Les Time Slots sont agrégés => débits plus importants.

GPRS

- Sur les timeslots d'un TRX, certains sont alloués au GPRS, mais la voix a toujours la priorité
- Utilise la capacité libre
- On peut utiliser jusqu' à 8 Time Slots (8 x 21.4 kbit/s + header = 171 kbit/s pour CS-4).
- La transmission peut se faire indépendamment en UpLink et en DownLink mais pas forcément en simultané (suivant le type de mobile)
- Généralement, on alloue plus de Time Slots en DownLink qu' en UpLink.

GPRS : structure du réseau

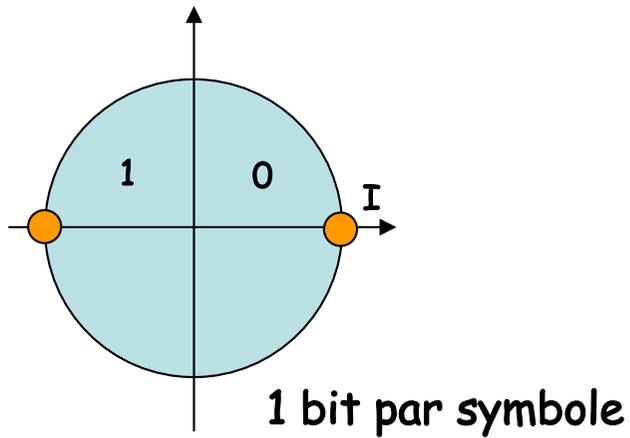


EDGE

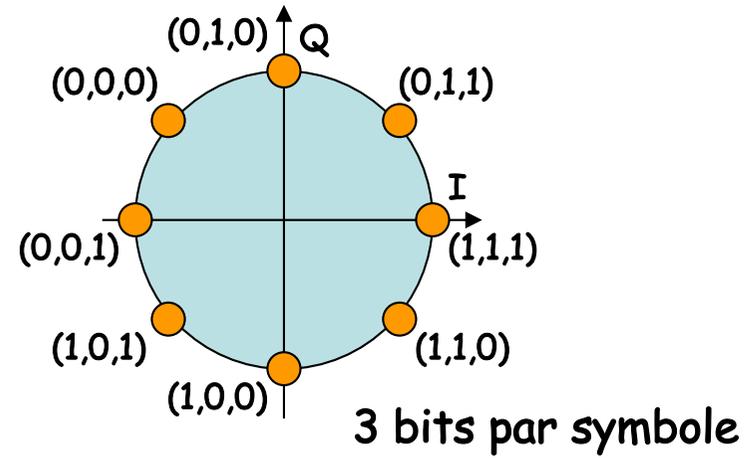
EDGE

- **EDGE** (Enhanced Data rate for GSM Evolution) ou EGPRS
 - Le débit max du GPRS n' est valable que pour des C/I importants (utilisation du CS-4), ce qui n' est pas toujours le cas.
 - On va donc changer de modulation GMSK => 8-PSK. La vitesse de modulation est la même que pour le GMSK mais permet un débit instantané 3 fois plus élevé, chaque état de modulation transmettant l' information relative à 3 bits.
 - Débits du EDGE
 - 6 débits sont normalisés de PCS-1 à PCS-6 variant de 22,8 kbit/s à 69,2 kbit/s par Time Slot.
 - Le débit max instantané sera donc de 553 kbit/s (moy # 300 kbit/s).

Modulation EDGE



Modulation GMSK



Modulation EDGE

WiFi - IEEE 802.11

Définition

- Le **WI-FI** répond à la norme **IEEE 802.11**. La norme IEEE 802.11 (ISO/IEC 8802-11) est un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (WLAN).
- Le nom **Wi-Fi** (contraction de **Wireless Fidelity**) correspond initialement au nom donné à la certification délivrée par la WECA (<http://www.weca.org/>) Etats-Unis (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), l'organisme chargé de maintenir l'interopérabilité entre les matériels répondant à la norme 802.11.
- C' est la Wi-Fi Alliance qui pose le **label** “ Wi-Fi ” et certifie les produits des constructeurs (+200 sociétés).
- Par abus de langage (et pour des raisons de marketing) le nom de la norme se confond aujourd'hui avec le nom de la certification. Ainsi un réseau Wifi est en réalité un réseau répondant à la norme 802.11.

WiFi est un réseau cellulaire

Antamedia HotSpot Software

192.168.0.11 - 192.168.0.49



192.168.0.51 - 192.168.0.99



192.168.0.10



192.168.0.2



192.168.0.1



192.168.0.50



192.168.1.1



192.168.1.2



ADSL



192.168.0.101



192.168.0.102



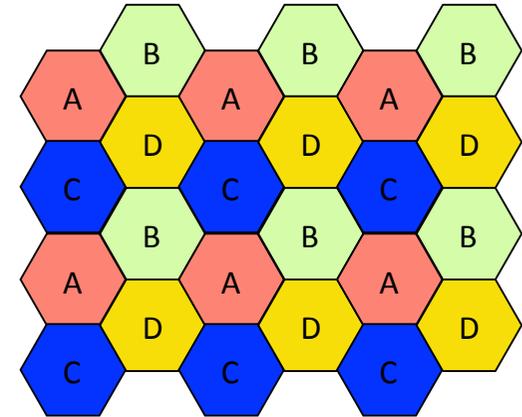
192.168.0.103



Ethernet connection

Network Topology Example

©2006 Antamedia



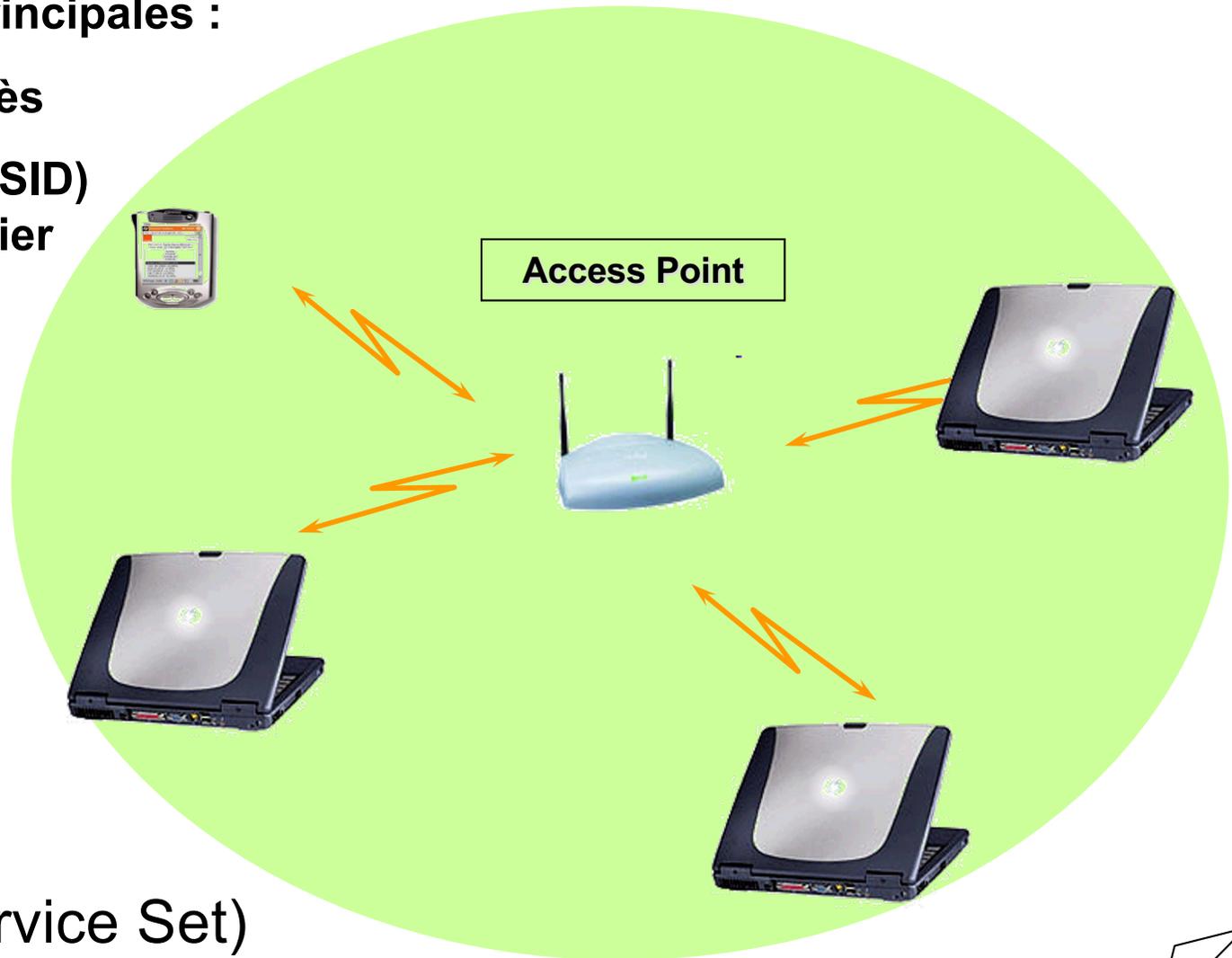
IEEE 802.11 : Architecture

- Il existe deux types de topologies :
 - Le **mode infrastructure**, avec **BSS** et **ESS**.
 - En mode infrastructure **BSS**, le réseau est composé d'un point d'accès qui permet aux différentes stations qui se trouvent dans sa cellule d'échanger des informations.
 - En mode infrastructure **ESS**, le réseau comporte plusieurs points d'accès reliés entre eux par un DS
 - Le **mode ad-hoc**
 - En mode ad-hoc, ne comporte pas de points d'accès, ce sont les stations (avec cartes Wi-Fi) qui entrent elles mêmes en communication.

IEEE 802.11 : Architecture BSS

Caractéristiques principales :

- 1 seul point d'accès
- Nom de réseau (SSID)
Service Set Identifier



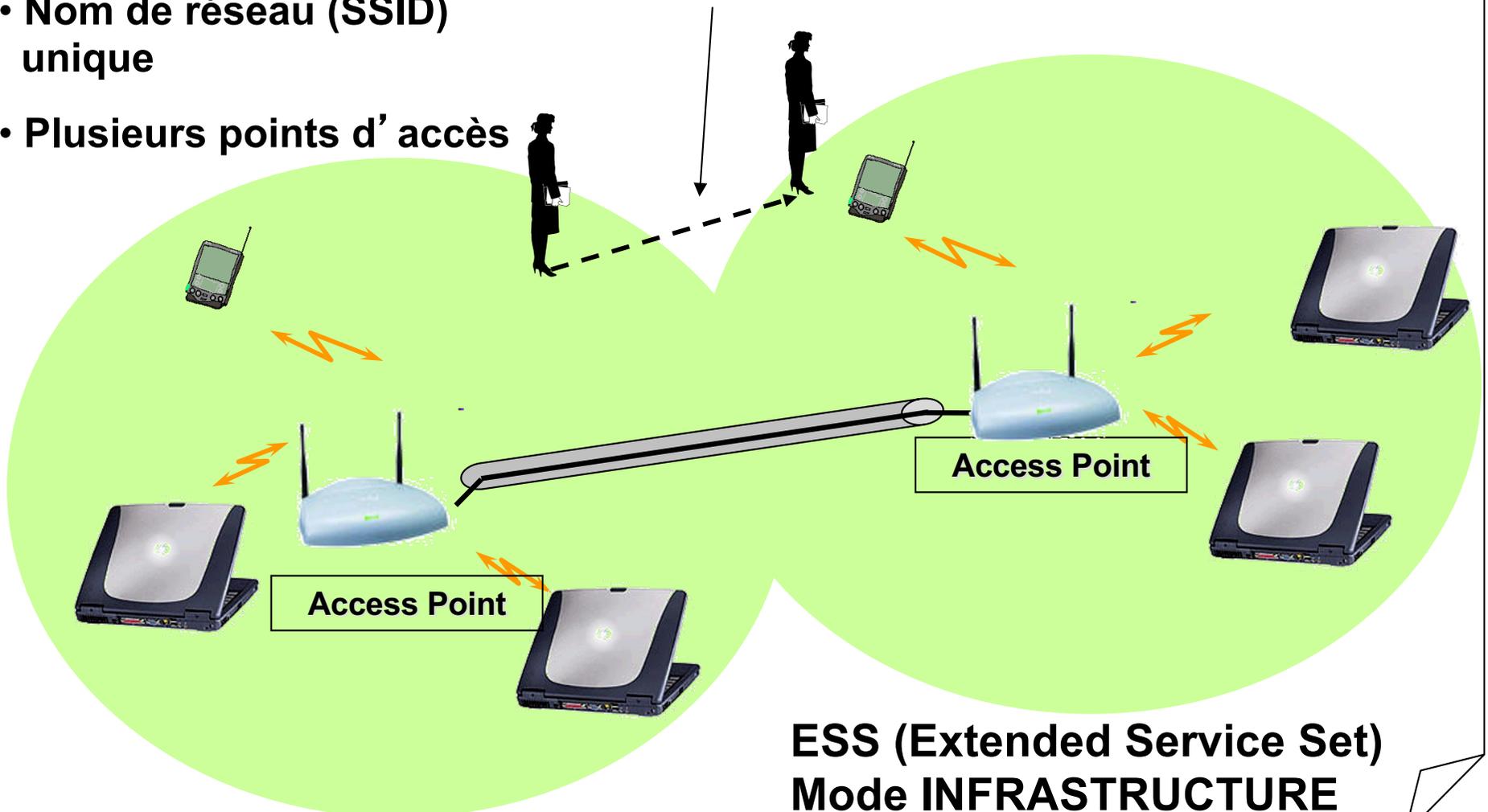
BSS (Basic Service Set)

IEEE 802.11 : Architecture ESS et handover

Caractéristiques principales :

- Nom de réseau (SSID) unique
- Plusieurs points d'accès

Mécanisme de handover



Premiers standards IEEE 802.11

- **802.11** : L' ancêtre du réseau sans fil, sur 2,4 GHz modulation DSSS ou saut de fréquence (aucune norme imposée), d' un débit de 2 Mb/s et pratiquement pas inter-opérable de constructeur à constructeur.
- **802.11b** : premier réseau Ethernet sans fil interopérable, sur 2,4 GHz, offrant un débit physique de 11 Mb/s (modulation DSSS, accès par CSMA/CA et détection de porteuse)
- **802.11a** : (baptisé WiFi 5) historiquement c' est le second projet de réseau Ethernet sans fil sur 5 GHz, elle permet d'obtenir un haut débit (54 Mbps théoriques, 30 Mbps réels). Pas de compatibilité avec 802.11b
- **802.11g** : Adaptation d' OFDM aux réseaux 802.11b (compatibilité) (passage à 54 Mb/s). La norme 802.11g a une compatibilité ascendante avec la norme 802.11b.



d · m

Réseaux locaux 802.11 : standards physiques

[masquer]

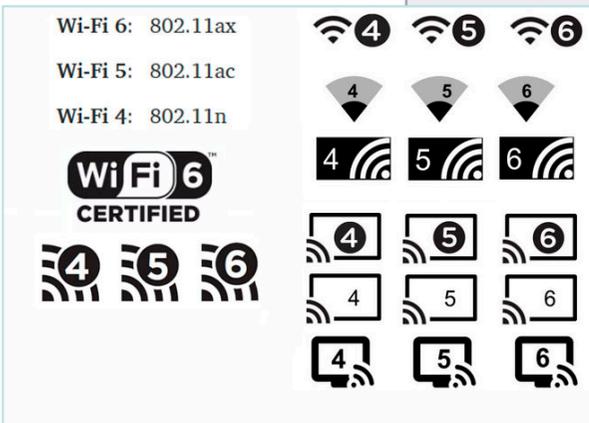
Protocole 802.11	date ²	Fréquence (GHz)	largeur de bande (MHz), (GHz)	Débit binaire ³ (Mbit/s), (Gbit/s)	Nombre maximum de flux MIMO	Codage / Modulation	Portée	
							Intérieur	Extérieur
							(mètres)	(mètres)
802.11-1997 (d'origine)	juin 1997	2,4	79 ou 22 ⁴ MHz	1, 2 Mbit/s	NC	FHSS, DSSS	20 m	100 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)	250 m ⁵
			40 MHz	15 à 150 Mbit/s ^[B] (13,5 à 135) ^[C]				
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 ⁶	NC	OFDM ou porteuse unique	10 m ⁷	
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 ²	0,9	1 à 8 MHz	0,6 à 8,6 Mbit/s ⁸	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 ⁹	58,3 à 70,2	2,16 à 8,64 GHz	20 à 176 Gbit/s	4 ¹⁰	OFDM ou <i>single carrier</i>	100 m	500

Nouvelles générations WiFi

- Terme "génération" pour le grand public

Wi-Fi Generations

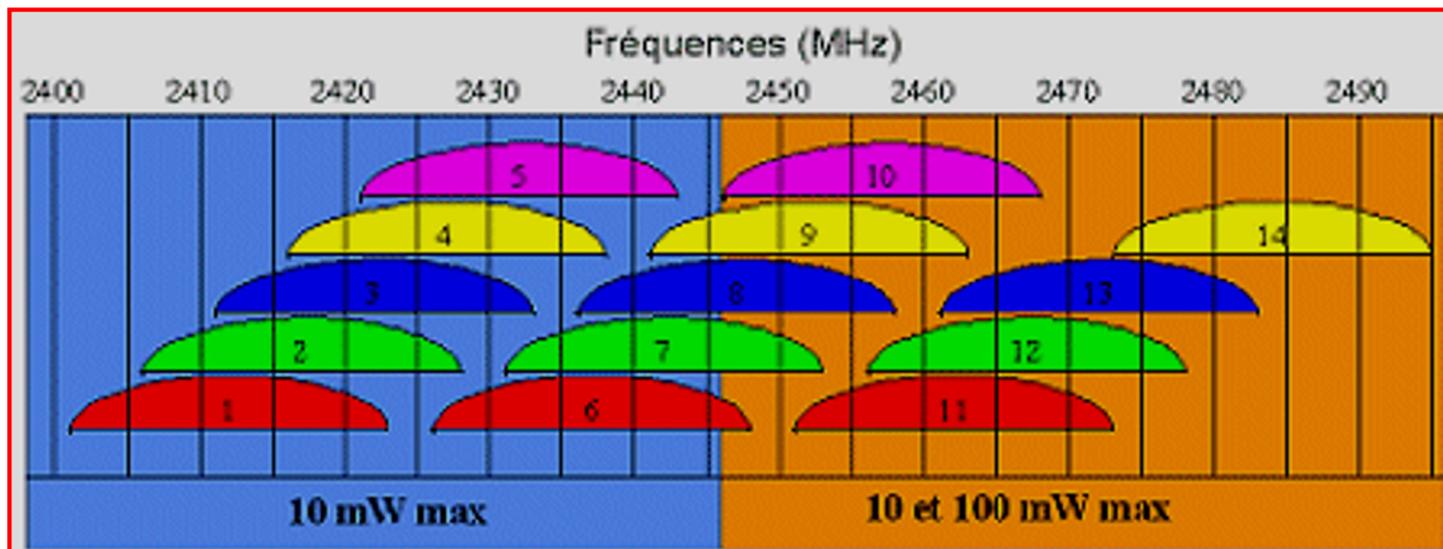
Generation/IEEE Standard	Maximum Linkrate	Adopted	Frequency
Wi-Fi 6E (802.11ax)	600 to 9608 Mbit/s	2019	6 GHz
Wi-Fi 6 (802.11ax)	600 to 9608 Mbit/s	2019	2.4/5 GHz
Wi-Fi 5 (802.11ac)	433 to 6933 Mbit/s	2014	5 GHz
Wi-Fi 4 (802.11n)	72 to 600 Mbit/s	2008	2.4/5 GHz
802.11g	6 to 54 Mbit/s	2003	2.4 GHz
802.11a	6 to 54 Mbit/s	1999	5 GHz
802.11b	1 to 11 Mbit/s	1999	2.4 GHz
802.11	1 to 2 Mbit/s	1997	2.4 GHz



Bande ISM

(Industrial, Scientific and Medical)

- Bande ISM
 - Bande divisée en 14 canaux de 20 MHz
 - Problème de recouvrement
 - Superposition de 3 réseaux au sein d'un même espace
 - Largeur de bande 83 MHz



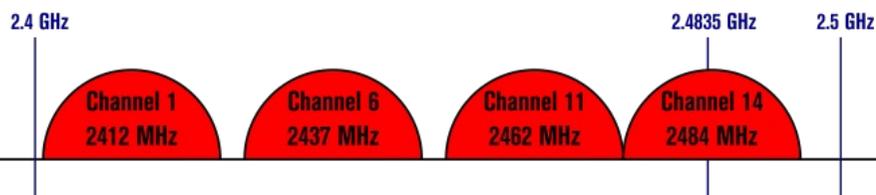
Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fréquence (GHz)	2.412	2.417	2.422	2.427	2.432	2.437	2.442	2.447	2.452	2.457	2.462	2.467	2.472	2.484

Canaux sans recouvrement

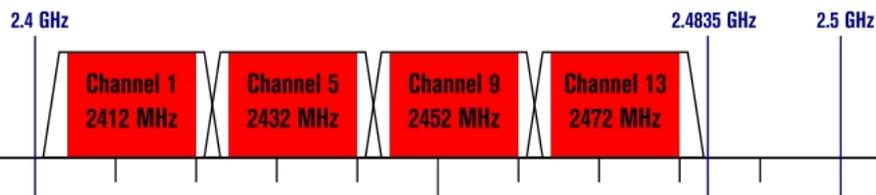
- Les canaux 1, 6 et 11 sont les plus utilisés

Non-Overlapping Channels for 2.4 GHz WLAN

802.11b (DSSS) channel width 22 MHz



802.11g/n (OFDM) 20 MHz ch. width - 16.25 MHz used by sub-carriers

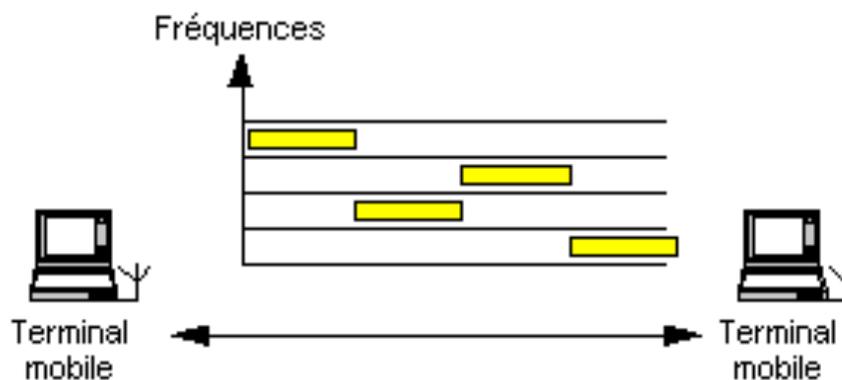


IEEE 802.11

Couche physique

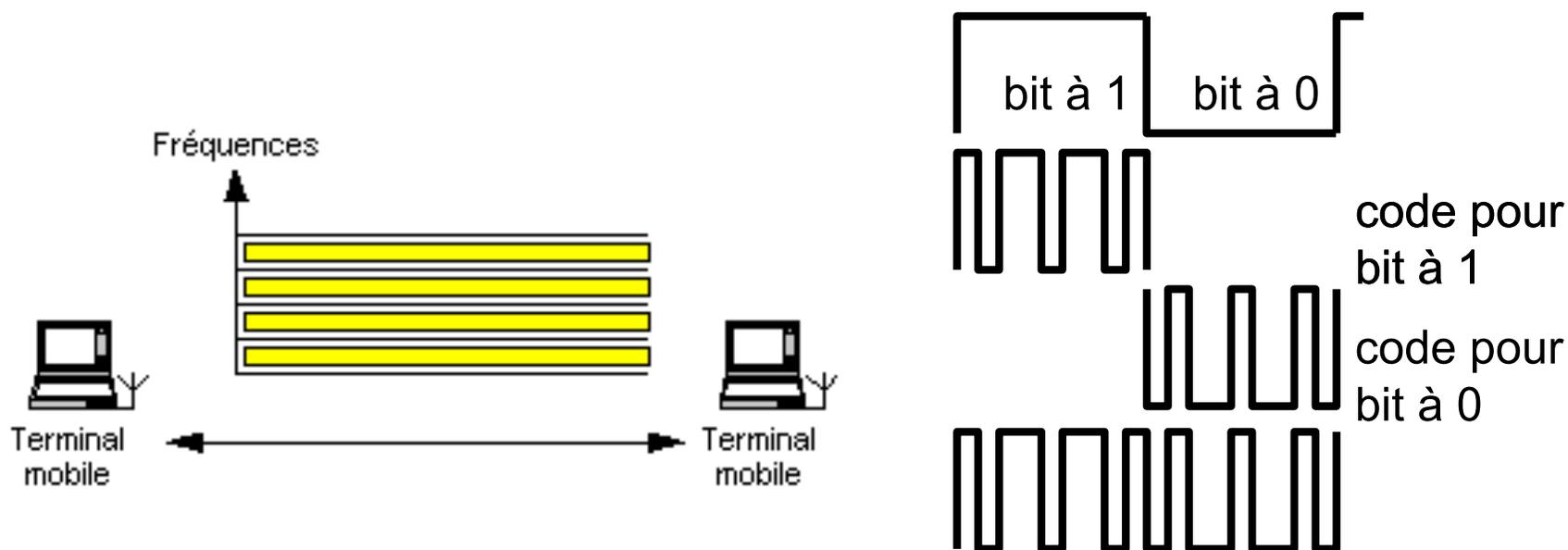
FHSS : étalement de spectre par saut de fréquence

- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) : consiste à découper la large bande de fréquence en un minimum de 75 canaux (hops ou sauts d'une largeur de 1MHz), puis de transmettre en utilisant une combinaison de canaux connue de toutes les stations de la cellule.
- Dans la norme 802.11, la bande de fréquence 2.4 - 2.4835 GHz permet de créer 79 canaux de 1 MHz. La transmission se fait ainsi en émettant successivement sur un canal puis sur un autre pendant une courte période de temps (d'environ 400 ms), ce qui permet à un instant donné de transmettre un signal plus facilement reconnaissable sur une fréquence donnée.



DSSS : étalement de spectre à séquence directe

- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) : consiste à transmettre pour chaque bit une séquence (11bits) . Ainsi chaque bit valant 1 est remplacé par une séquence de bits et chaque bit valant 0 par son complément.



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

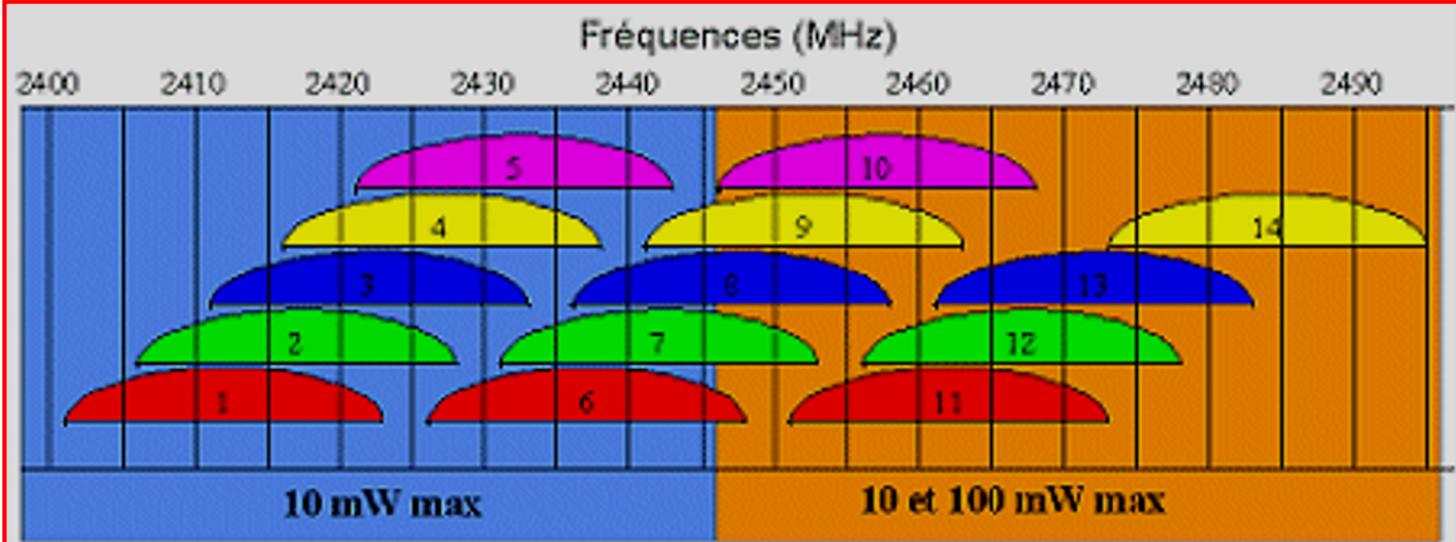
Types de modulation

- PSK (Modulation de phase)
- QPSK (Modulation de phase en quadrature)
- CCK (Complementary Code Keying)
Symboles de m bits codés par une séquence de m bits
(codes orthogonaux complexes)

Technologie	Codage	Type de modulation	Débit
802.11b	DSSS (11 bits)	PSK	1Mbps
802.11b	DSSS (11 bits)	QPSK	2Mbps
802.11b	CCK (4 bits)	QPSK	5.5Mbps
802.11b	CCK (8 bits)	QPSK	11Mbps
802.11a	CCK (8 bits)	OFDM	54Mbps
802.11g	CCK (8 bits)	OFDM	54Mbps

Bande ISM (Industrial, Scientific and Medical)

- Bande ISM
 - Bande divisée en 14 canaux de 20 MHz
 - Problème de recouvrement
 - Superposition de 3 réseaux au sein d'un même espace
 - Largeur de bande 83 MHz



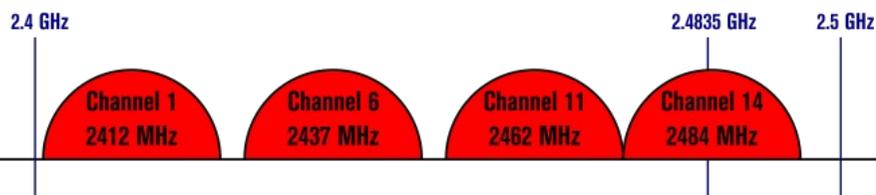
Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fréquence (GHz)	2.412	2.417	2.422	2.427	2.432	2.437	2.442	2.447	2.452	2.457	2.462	2.467	2.472	2.484

Canaux sans recouvrement

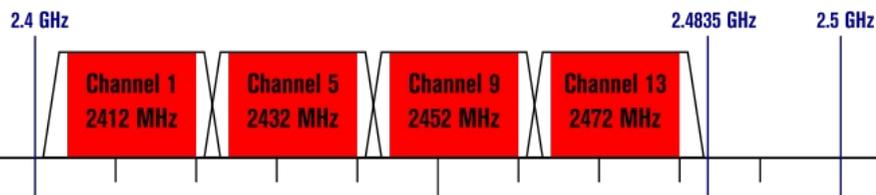
- Les canaux 1, 6 et 11 sont les plus utilisés

Non-Overlapping Channels for 2.4 GHz WLAN

802.11b (DSSS) channel width 22 MHz



802.11g/n (OFDM) 20 MHz ch. width - 16.25 MHz used by sub-carriers



IEEE 802.11

Couche Liaison

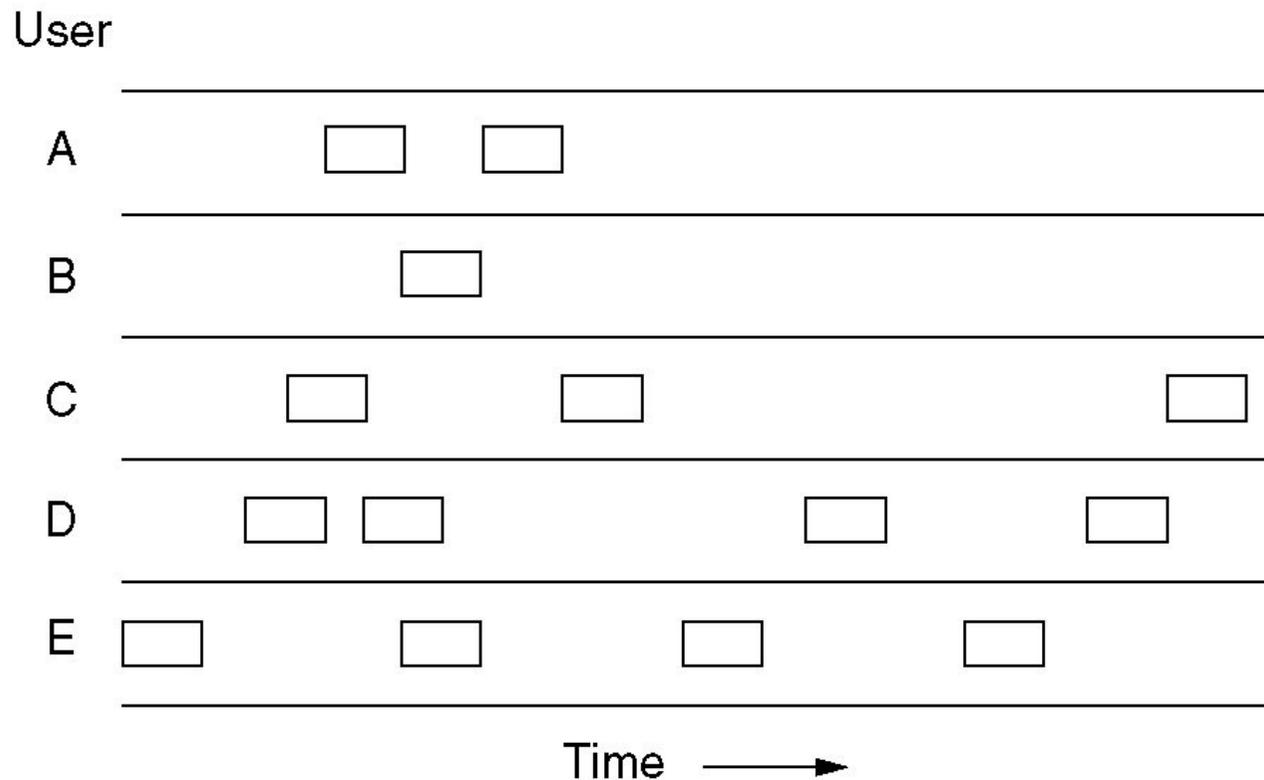
Couche Liaison de données

Couche liaison de données	LLC 802.2 Contrôle de liaison logique
	MAC 802.11, sécurité, etc ... Contrôle d'accès au support

- La couche MAC définit 2 méthodes d'accès différentes
 - La méthode CSMA/CA utilisant la Distributed Coordination Function
 - La Point Coordination Function (PCF) : voix, vidéos ...
- La couche MAC offre 2 mécanismes de robustesse :
 - sommes de contrôle (CRC sur 32 bits)
 - fragmentation des paquets

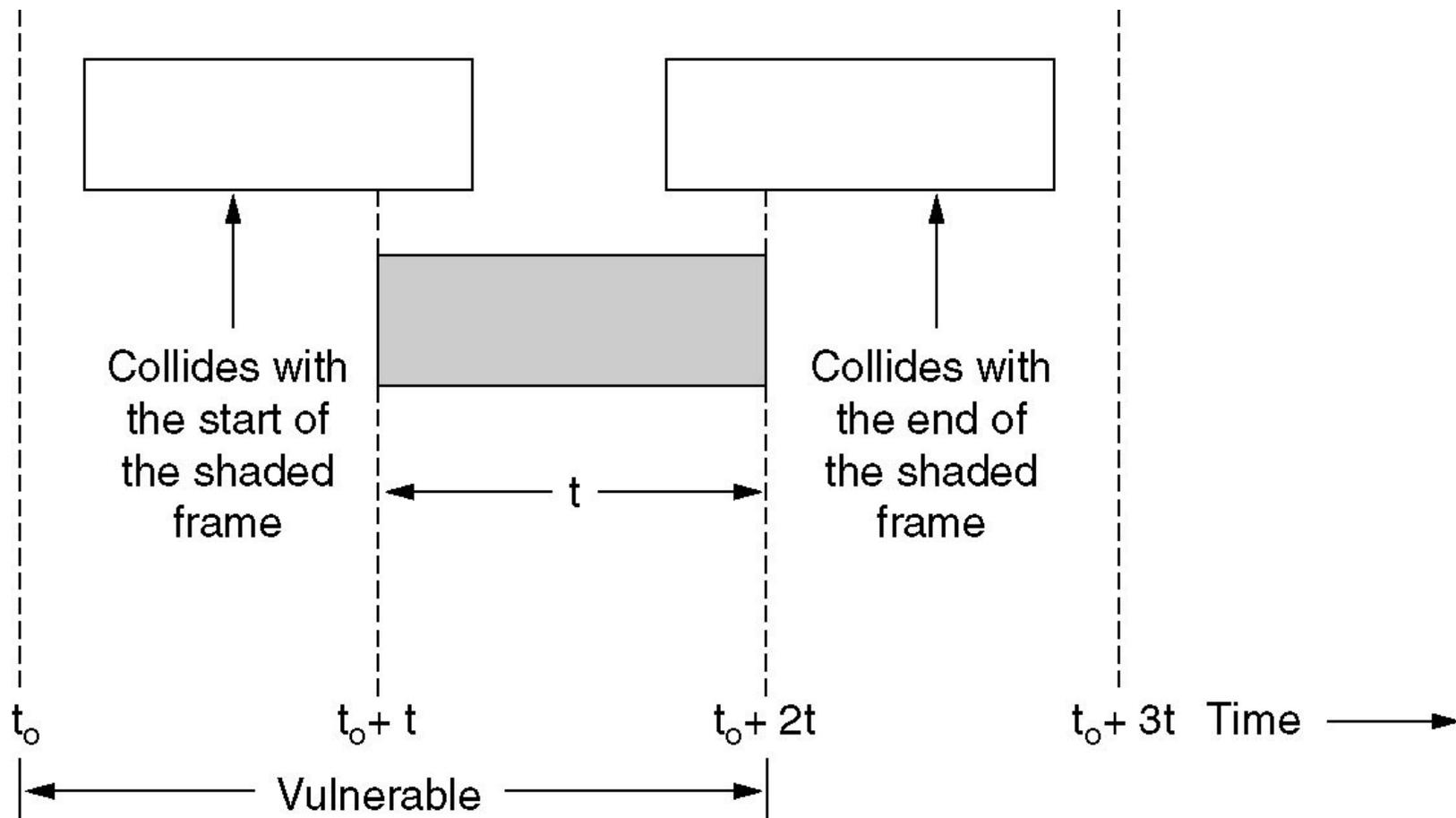
Pure ALOHA (Hawaii, 1970)

- En ALOHA pure, les trames sont envoyées à n'importe quel moment!
- Débit max: 18.4%



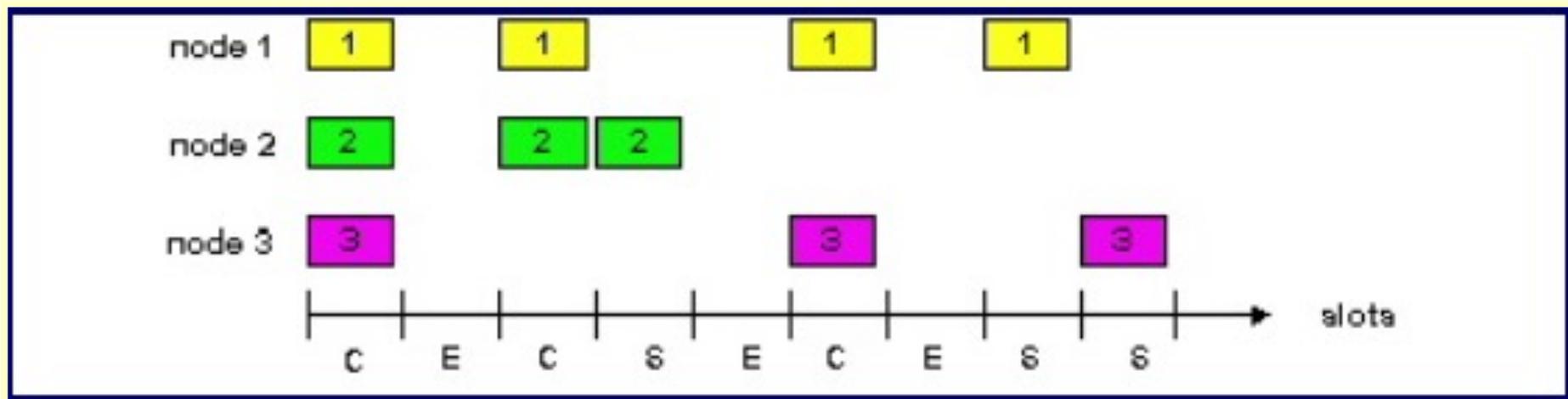
Pure ALOHA (2)

Période vulnérable pour la trame grisée.



Slotted Aloha

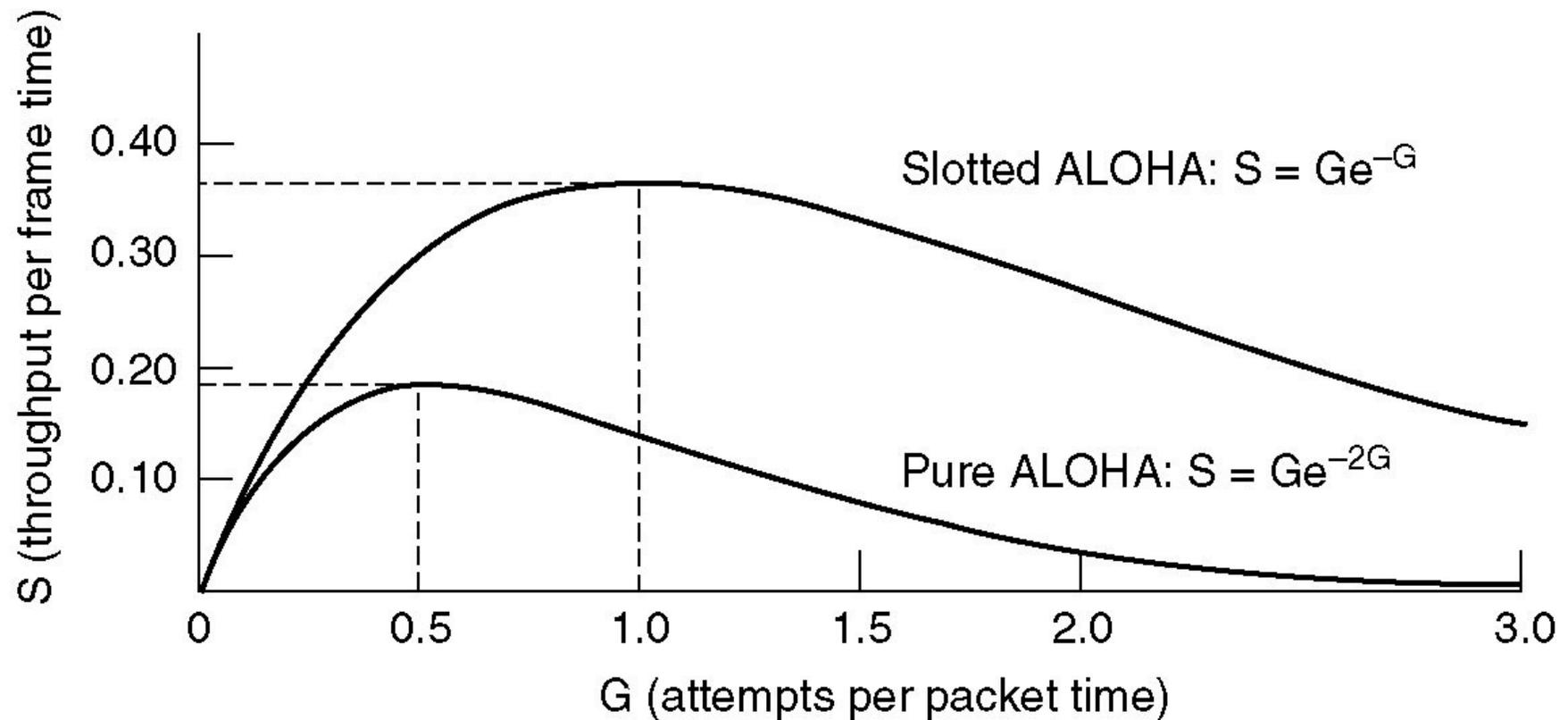
- time is divided into equal size slots (= pkt trans. time)
- node with new arriving pkt: transmit at beginning of next slot
- if collision: retransmit pkt in future slots with probability p , until successful.
- Maximum throughput: 37%



Success (S), Collision (C), Empty (E) slots

ALOHA performance

Throughput versus offered traffic for ALOHA systems.



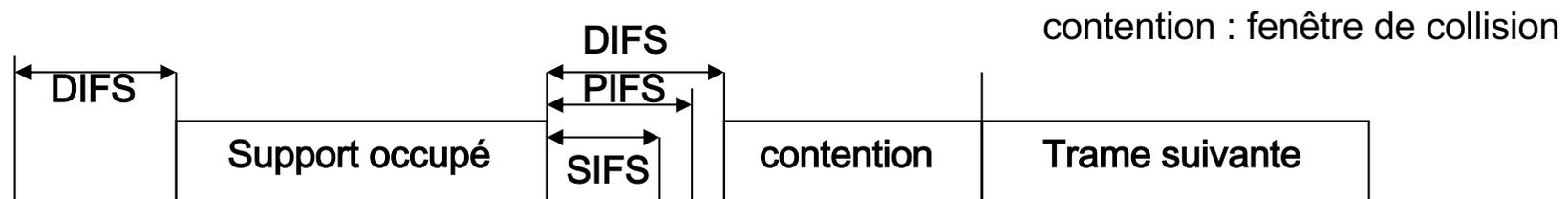
Méthode d'accès

- **Rappel** : dans un réseau **éthernet** filaire, utilisation de la méthode d'accès **CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)**
- Pour un environnement sans fil : utilisation **CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)** commun aux 3 normes : a, b et g, car :
 - 2 stations communiquant avec un récepteur (AP) ne s'entendent pas forcément mutuellement en raison de leur rayon de portée.
 - Caractéristique : utilise un mécanisme d'esquive de collision basé sur un principe d'accusés de réception (**ACK**) réciproques entre l'émetteur et le récepteur
 - Gère très efficacement les interférences et autres problèmes radio
 - Deux méthodes d'accès au canal basées sur CSMA/CA ont été implémentées pour les réseaux 802.11 : **DCF** et **PCF**

Méthode d'accès

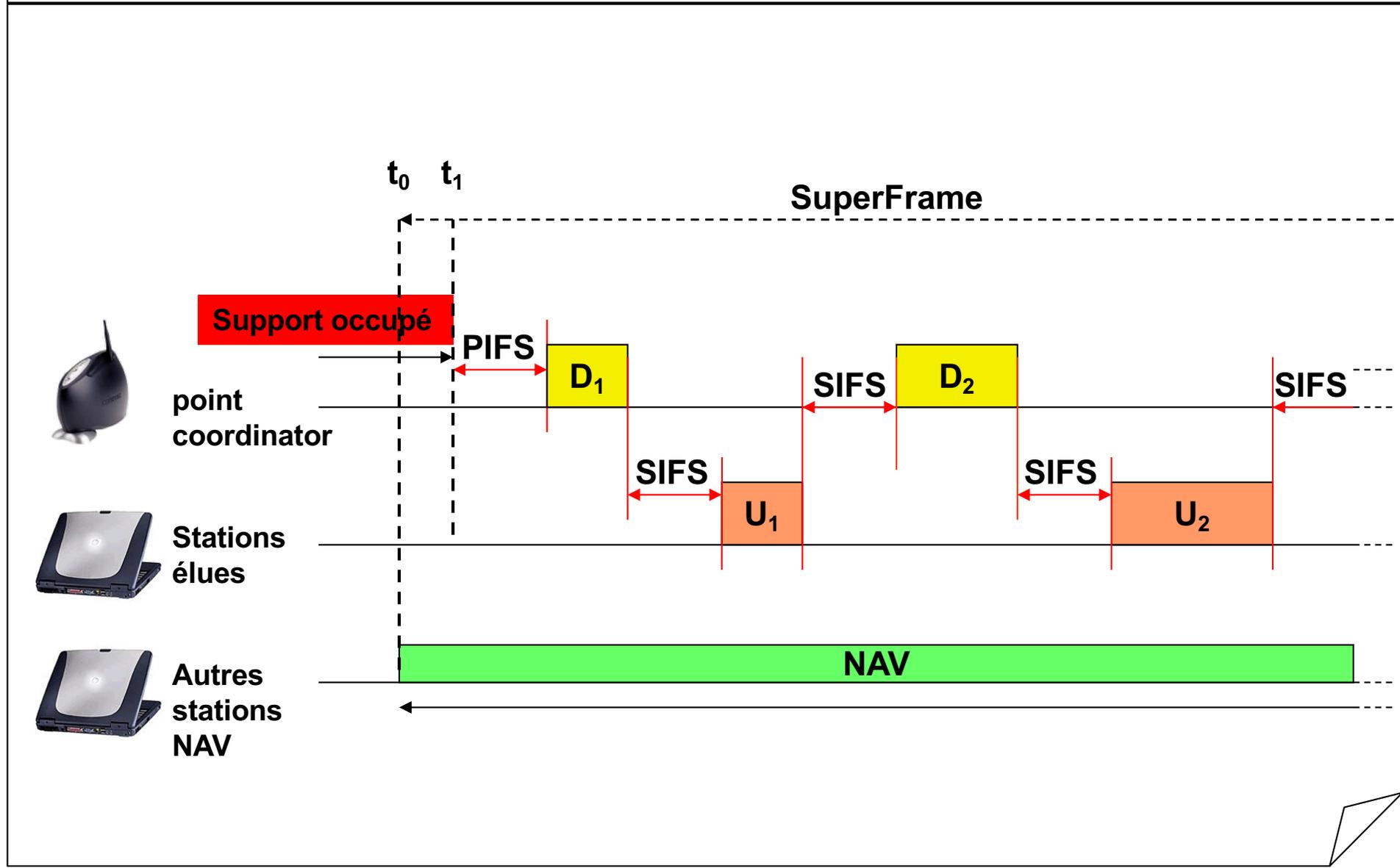
CSMA/CA est basé sur :

- L'écoute du support :
 - Mécanisme de réservation du support (Ready To Send /Clear To Send)
 - Network Allocation Vector (NAV)
- Les temporisateurs IFS (Inter Frame Spacing)
 - SIFS (Short IFS) : Plus haute priorité pour ACK, CTS interrogations en PCF
 - PIFS (PCF IFS) : Priorité Moyenne, pour le PCF, service en temps réel
 - DIFS (DCF IFS) : Priorité Faible pour le DCF
- L'algorithme de Backoff
- L'utilisation d'acquittement positif

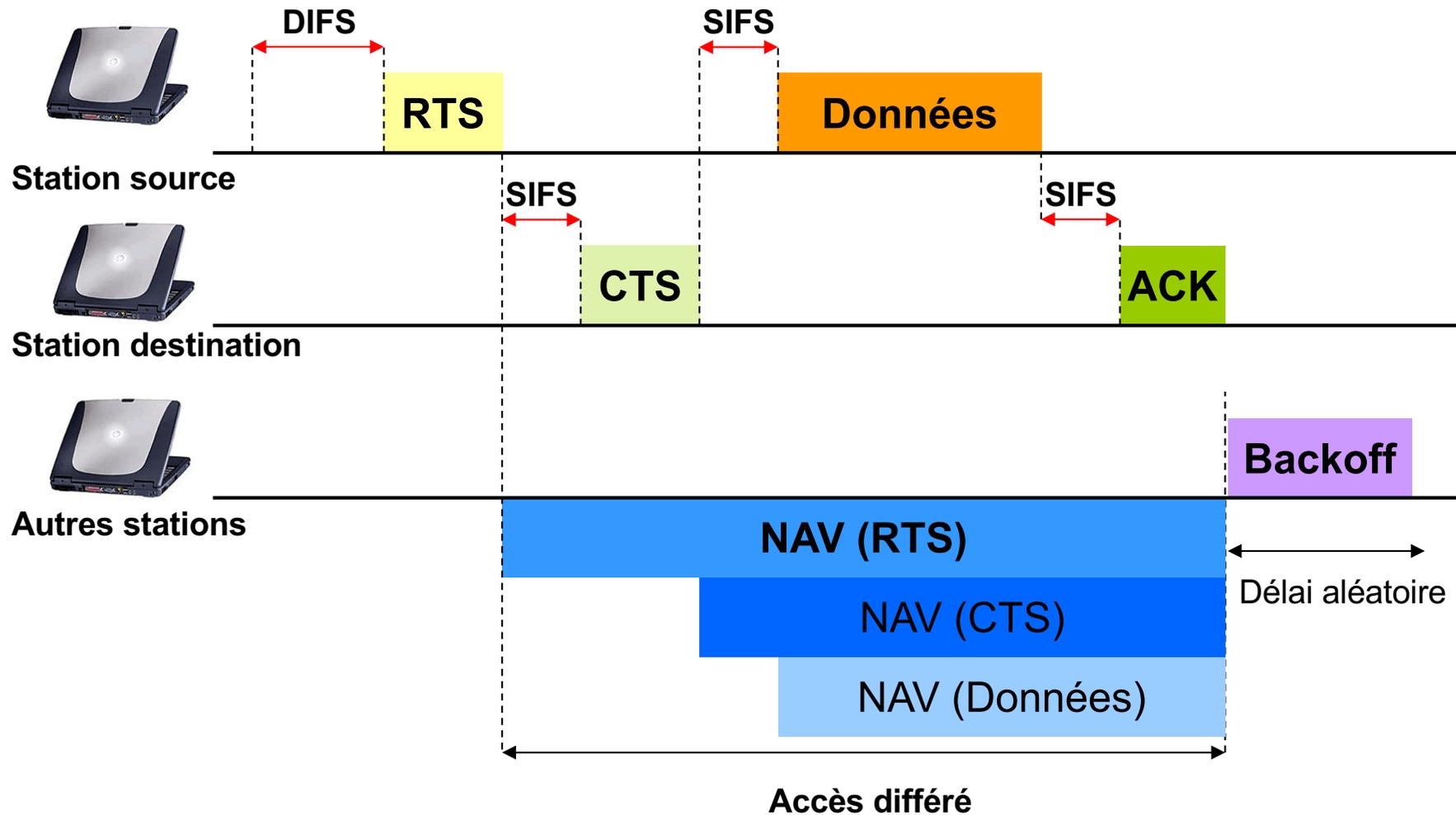


INFO

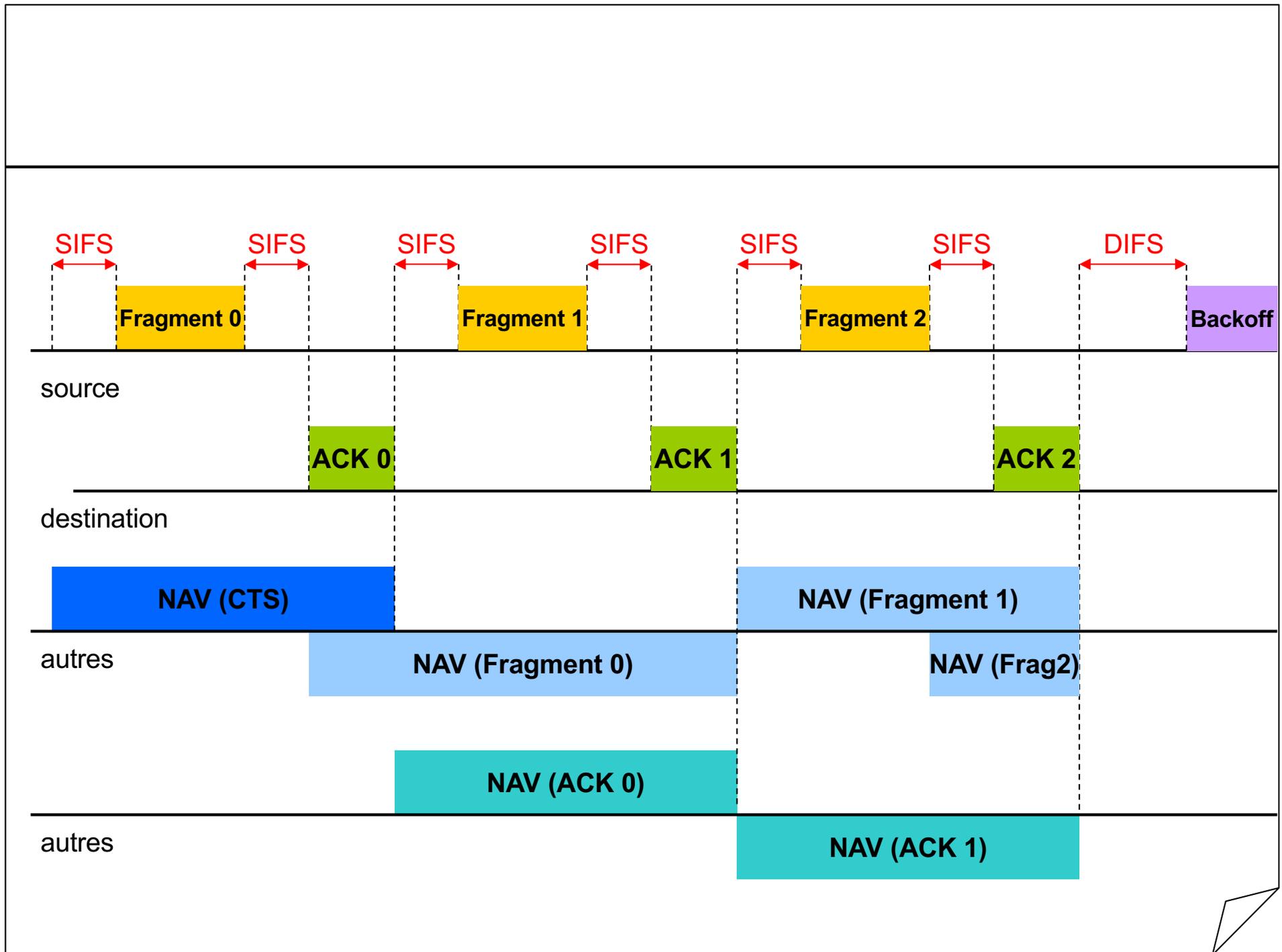
PCF (Point Coordination Function)

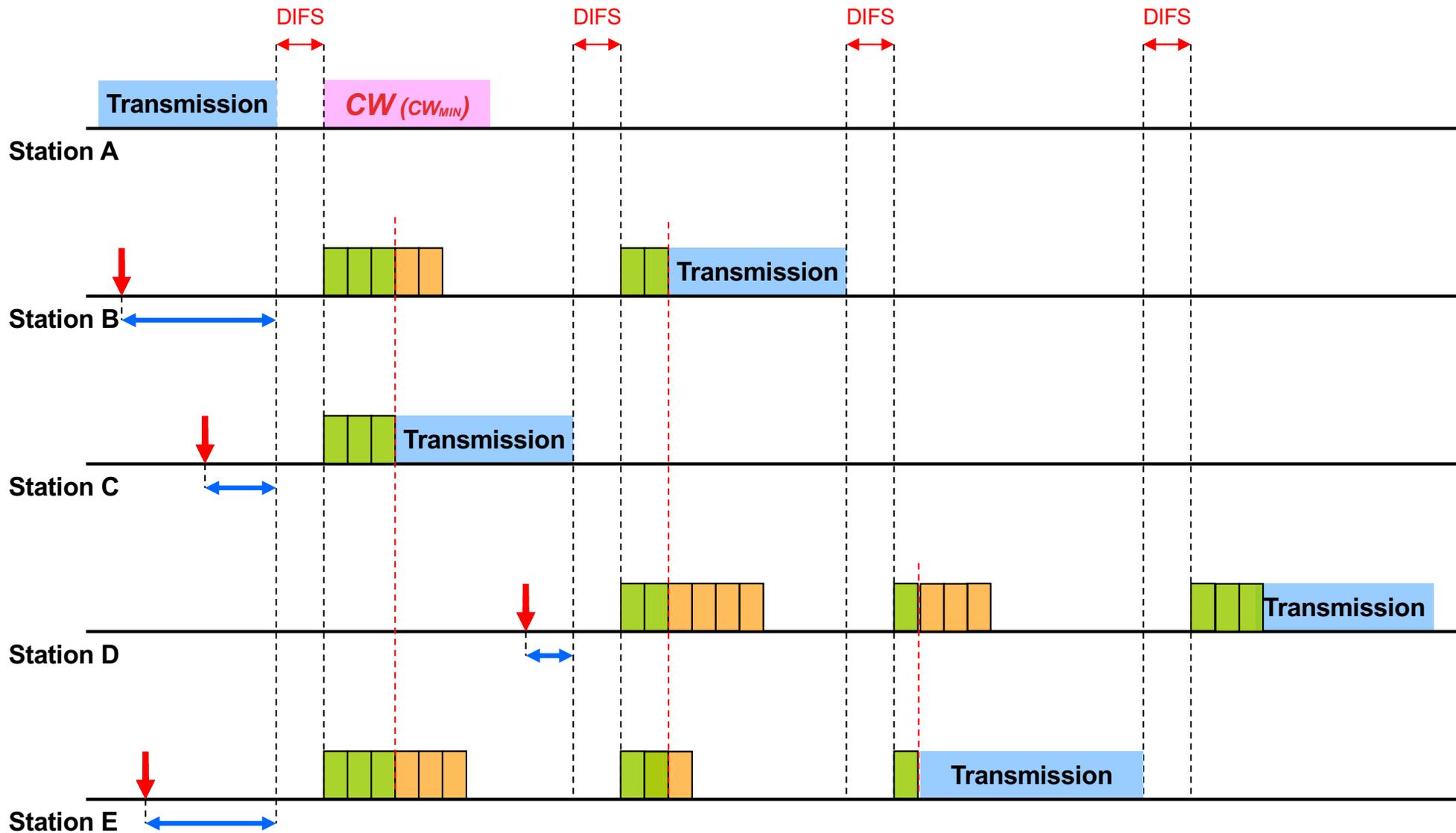


DCF (Distributed Coordination Function)



Supports empruntés à G. Pujolle





 Timeslot expiré

 La station accède et écoute le support

 CW (CW_{MIN})

Taille de la fenêtre de contention

Légende :

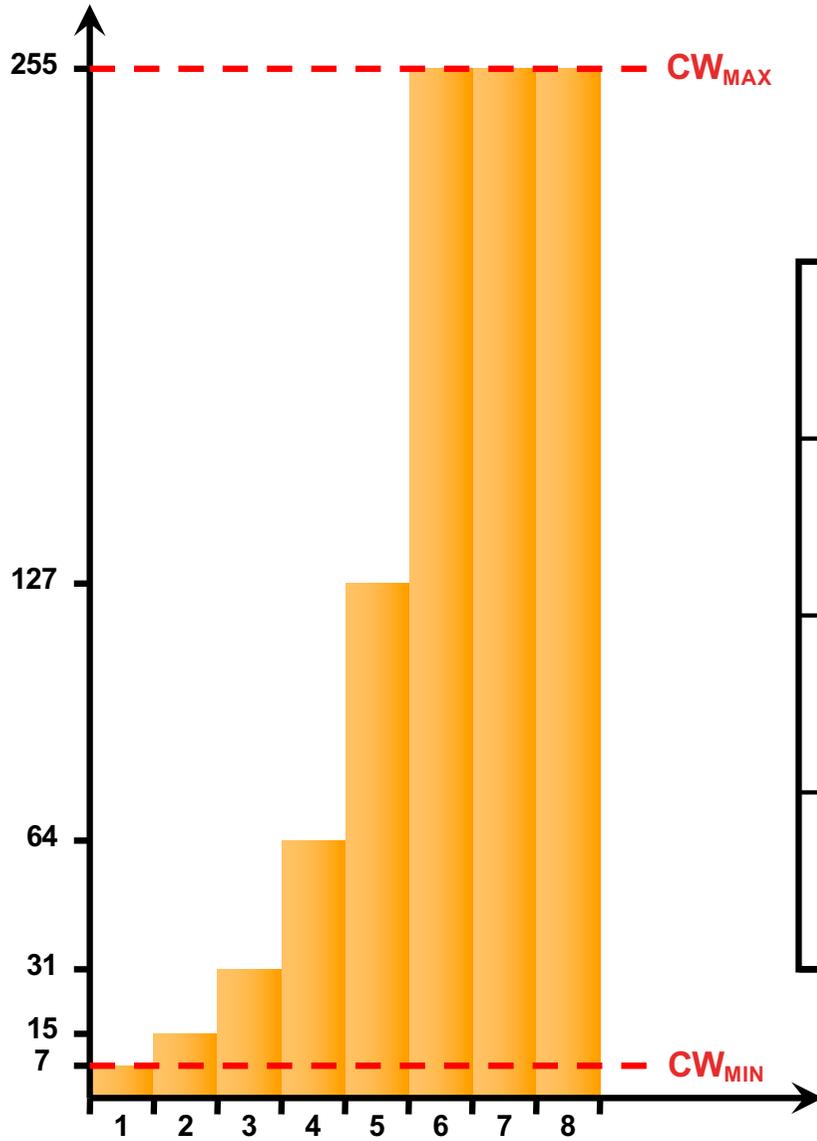
 Timeslot restant

 Temps d'attente dû à l'occupation du support par une autre station

INFO

fenêtre
de contention

Durées



	FHSS	DSSS	IR
Timeslot (µs)	50	20	8
SIFS (µs)	28	10	7
DIFS (µs)	128	50	19
PIFS (µs)	78	30	15

Nombre de tentatives de transmission