

Supports physiques, Transmission physique

C. Pham

Université de Pau et des Pays de l'Adour

Département Informatique

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

Congduc.Pham@univ-pau.fr



Copyright

- **Copyright © 2005 Congduc Pham; all rights reserved**
- **Les documents ci-dessous sont soumis aux droits d'auteur et ne sont pas dans le domaine public. Leur reproduction est cependant autorisée à condition de respecter les conditions suivantes :**
 - Si ce document est reproduit pour les besoins personnels du reproducteur, toute forme de reproduction (totale ou partielle) est autorisée à la condition de citer l'auteur.
 - Si ce document est reproduit dans le but d'être distribué à des tierces personnes il devra être reproduit dans son intégralité sans aucune modification. Cette notice de copyright devra donc être présente. De plus, il ne devra pas être vendu.
 - Cependant, dans le seul cas d'un enseignement gratuit, une participation aux frais de reproduction pourra être demandée, mais elle ne pourra être supérieure au prix du papier et de l'encre composant le document
- **Toute reproduction sortant du cadre précisé ci-dessus est interdite sans accord préalable écrit de l'auteur.**

Les différentes catégories de réseaux

- Les besoins et les contraintes ne sont pas du tout les mêmes d'une catégorie à l'autre. Les LANs sont souvent sur des support en partage, les MAN et les WAN sont plutôt point à point. La distance influe sur les mécanismes à mettre en oeuvre dans les protocoles. La notion de sécurité n'est plus la même etc...

<i>distance</i>	<i>localisation</i>	
0.1 m	Circuit	
1 m	Systeme	SAN
10 m	Pièce	SAN/LAN
100 m	Bâtiment	SAN/LAN
1 km	Campus	LAN
10 km	Ville	MAN
100 km	Pays	WAN
1000 km	Continent	
10000 km	Planète	Internet

Historique

- 1838 : Théorie (S. Morse)
- 1858 : Câble transatlantique
- 1864 : Équations de Maxwell
- 1865 : Télégraphe (S. Morse)
- 1876 : Téléphone (Bell)
- 1898 : 1ère communication mobile (Marconi, puis Armée US)
- 1915 : 1ère liaison téléphonique transcontinentale (Bell System)
- 1930 : Télévision (principes)

Historique

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

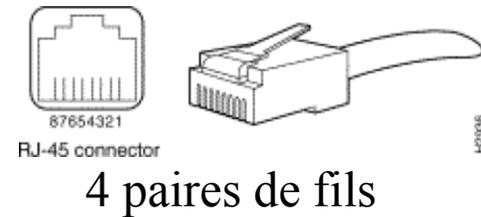
Historique

- 1970 : début des systèmes cellulaires analogiques
- 1980 : début des systèmes sans cordon
- 1983 : Études GSM (numérique)
- 1985 : Études DECT
- 1988 : Débuts GSM / Études CDMA
- 1990 : IEEE 802.11 Wireless LAN
- 1990 : Messagerie unilatérale (étape)
- 1991 : Déploiement GSM
- 1993 : DEC 1800, début IS-95 (CDMA)

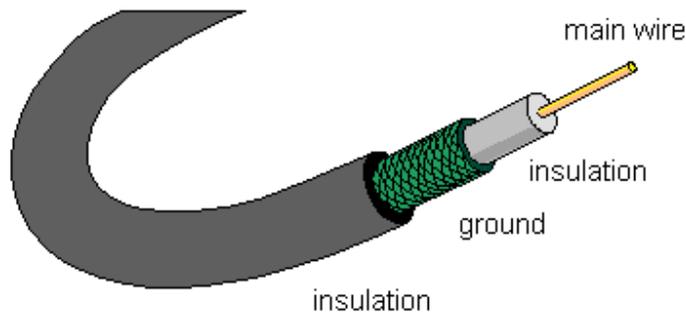
Support cuivre

■ Paire torsadée (STP et UTP)

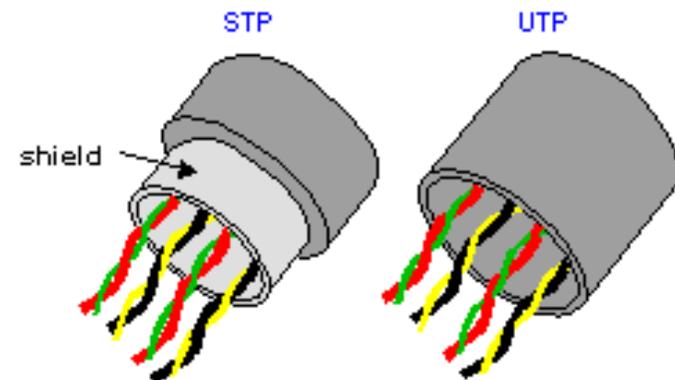
- peu coûteuse, symétrique, écranté ou non
- très utilisée (téléphone, réseaux locaux),
- large infrastructure existante,
- débit limité (centaine de Mbits/s)



From Computer Desktop Encyclopedia
© 1998 The Computer Language Co. Inc.



From Computer Desktop Encyclopedia
© 1998 The Computer Language Co. Inc.



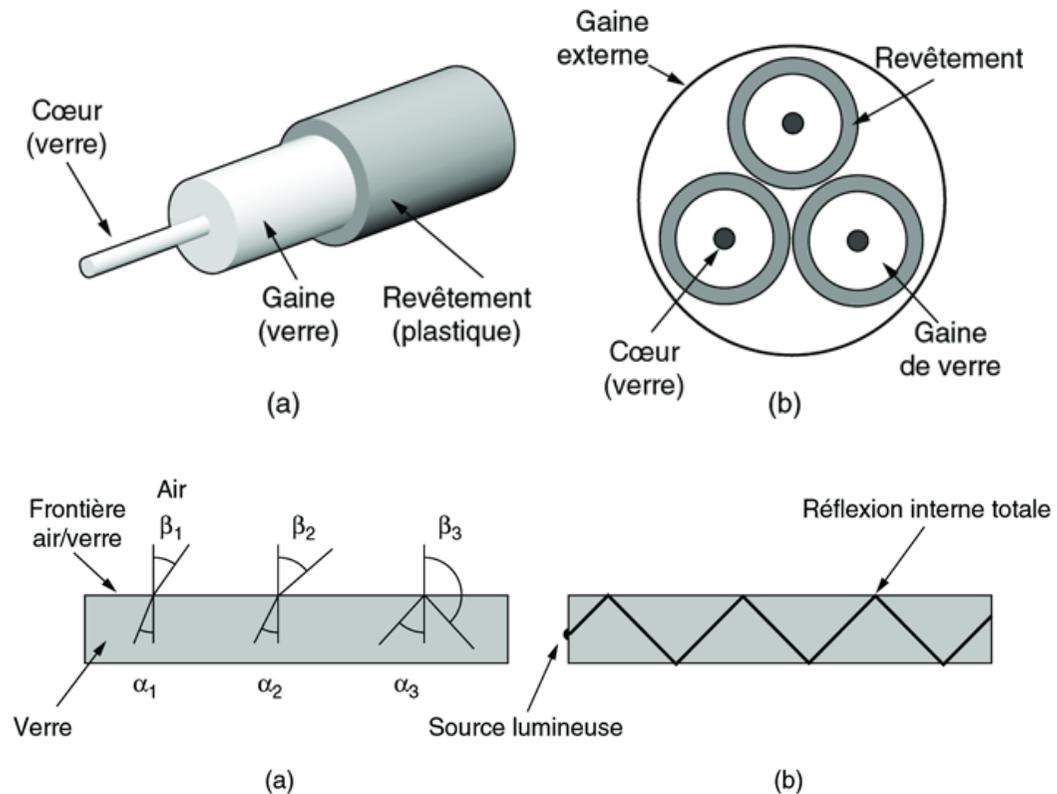
■ Câble coaxial

- plus coûteux, asymétrique mais,
- meilleure protection contre les interférences,
- distance plus élevée et meilleur débit (1 à 2 Gbits/s sur 1 km)

Fibres optiques (1)

■ Fibre optique

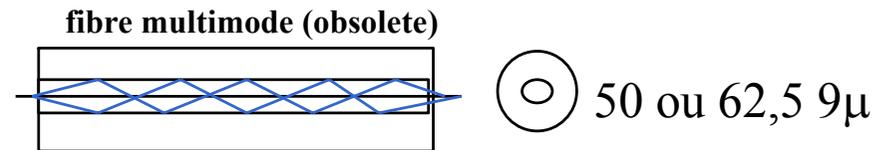
- de moins en moins coûteuse, plus légères, en silice le plus souvent, rarement en verre (atténuation). Le plastique est possible.
- environ 50km sans répéteurs.
- très haut-débit (50000 Gbits/s théorique) et très bonne fiabilité.



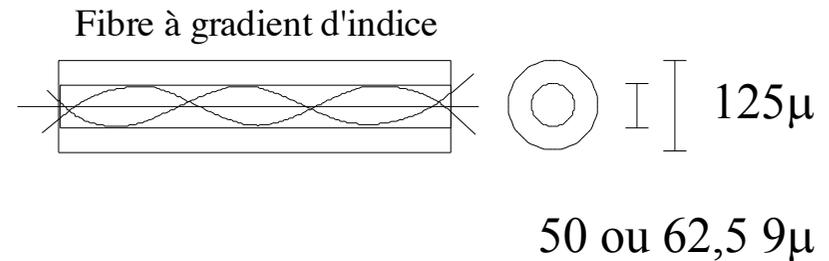
Fibres optiques (2)

■ Fibres optiques

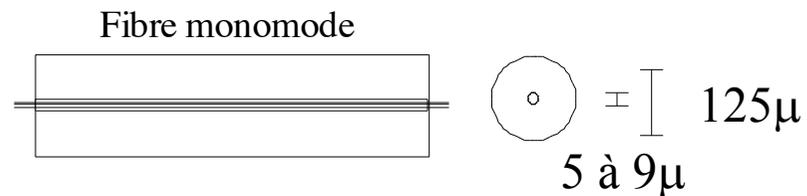
– multi-mode



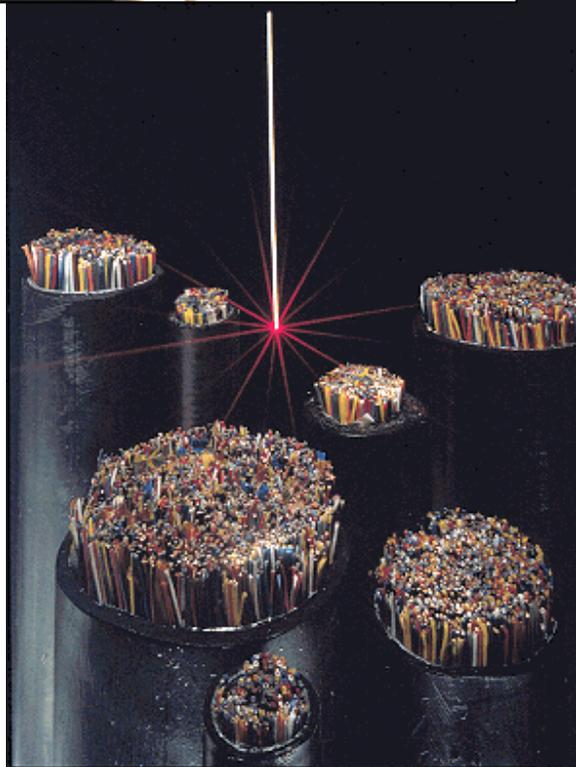
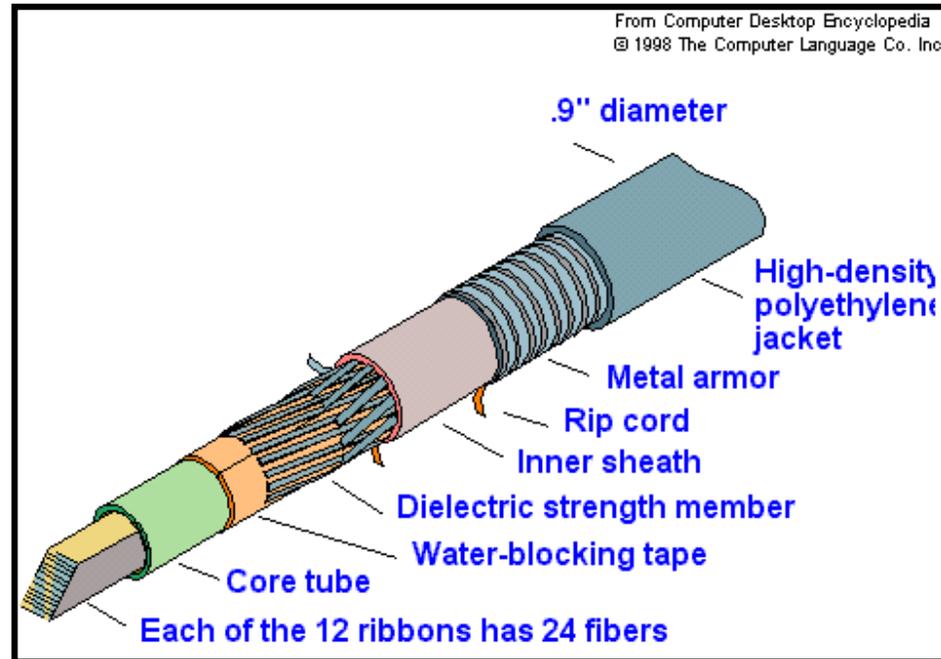
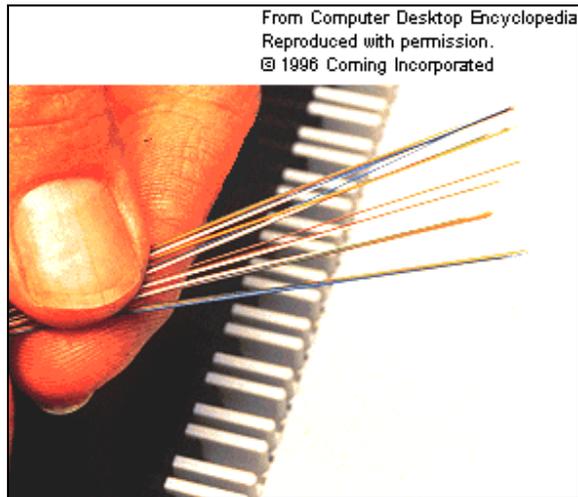
– à gradient d'indice



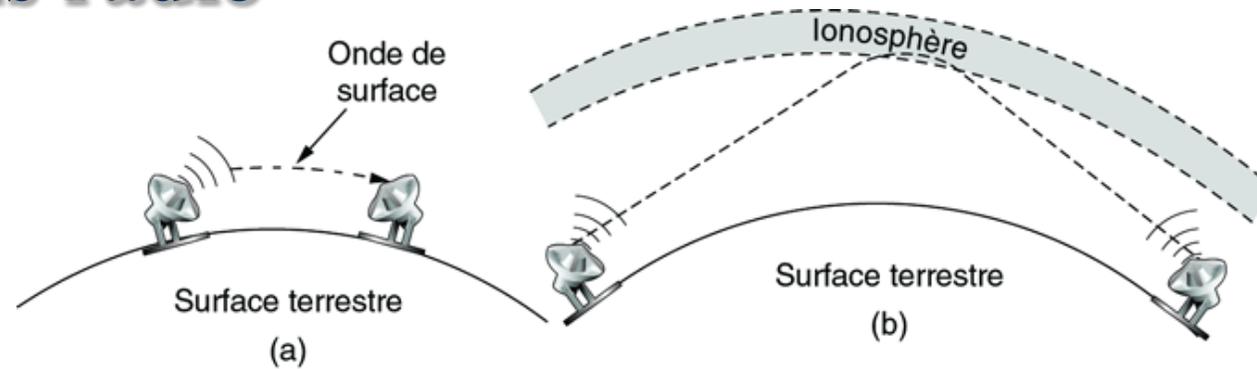
– mono-mode



Fibres optiques (3)



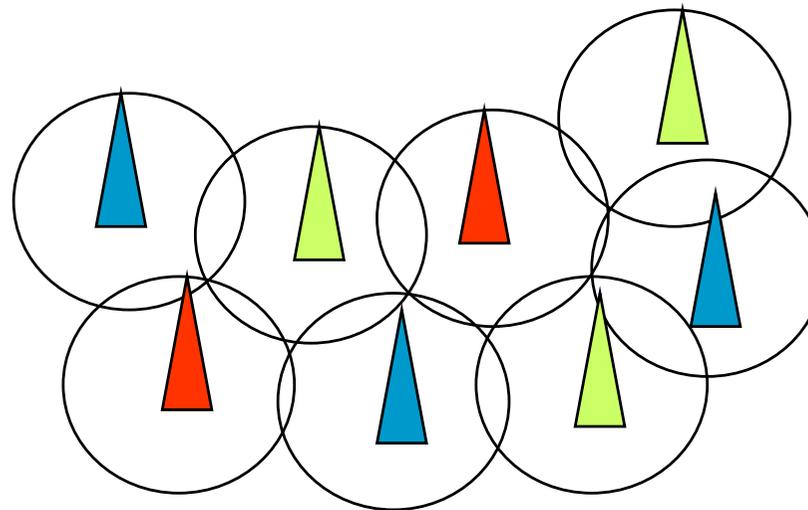
Liaisons radio



© Pearson Education France

■ Sans fils

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



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

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

Satellites

- répéteurs dans le ciel, d'une base source vers une base destination,
- possède généralement plusieurs transponder (1 transponder = plusieurs centaines de communications téléphoniques),
- faisceau large ou plus étroit (very small aperture terminals, VSATs)
- grande bande passante (>500MHz),
- plusieurs orbites disponibles,
- grande couverture géographique,
- mais délais plus grands (250 a 300 ms) et,
- coût élevé par équipement.

60 GHz = Fréquence d'échange entre satellites.
Il y a environ 1000 Satellites.

BANDES	FREQUENCES
BANDE C	4/6 GHz
BANDE KU	11/14 GHz
BANDE Ka	20/30 GHz

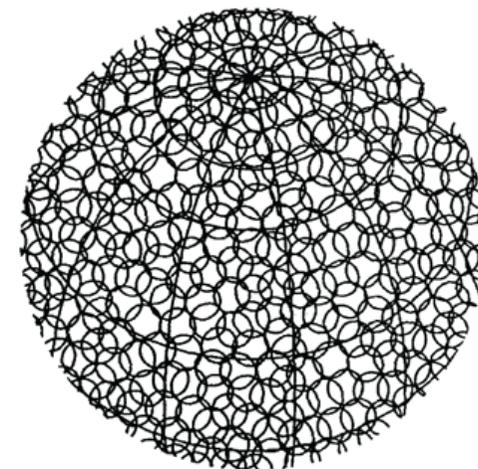
Satellites (suite)

Altitude (km)	Type	Latence (ms)	Satellites nécessaires
35 000	GEO	270	3
15 000 - 20 000	Ceinture de Van Allen extérieure		
10 000	MEO	35-85	10
5 000 - 10 000	Ceinture de Van Allen intérieure		
1-7	LEO	1-7	50

Iridium, 66 satellites
Initialement 77

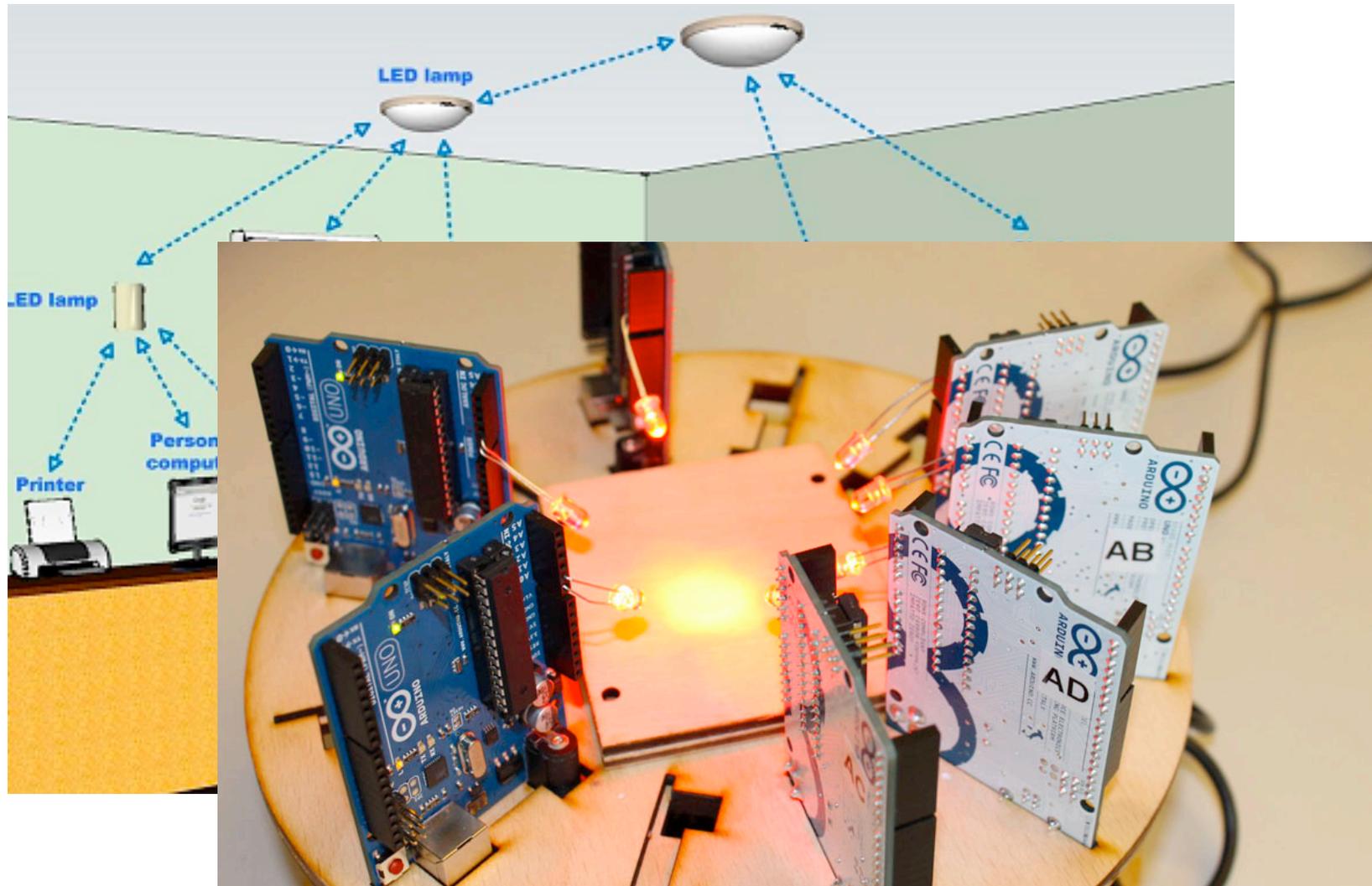


(a)



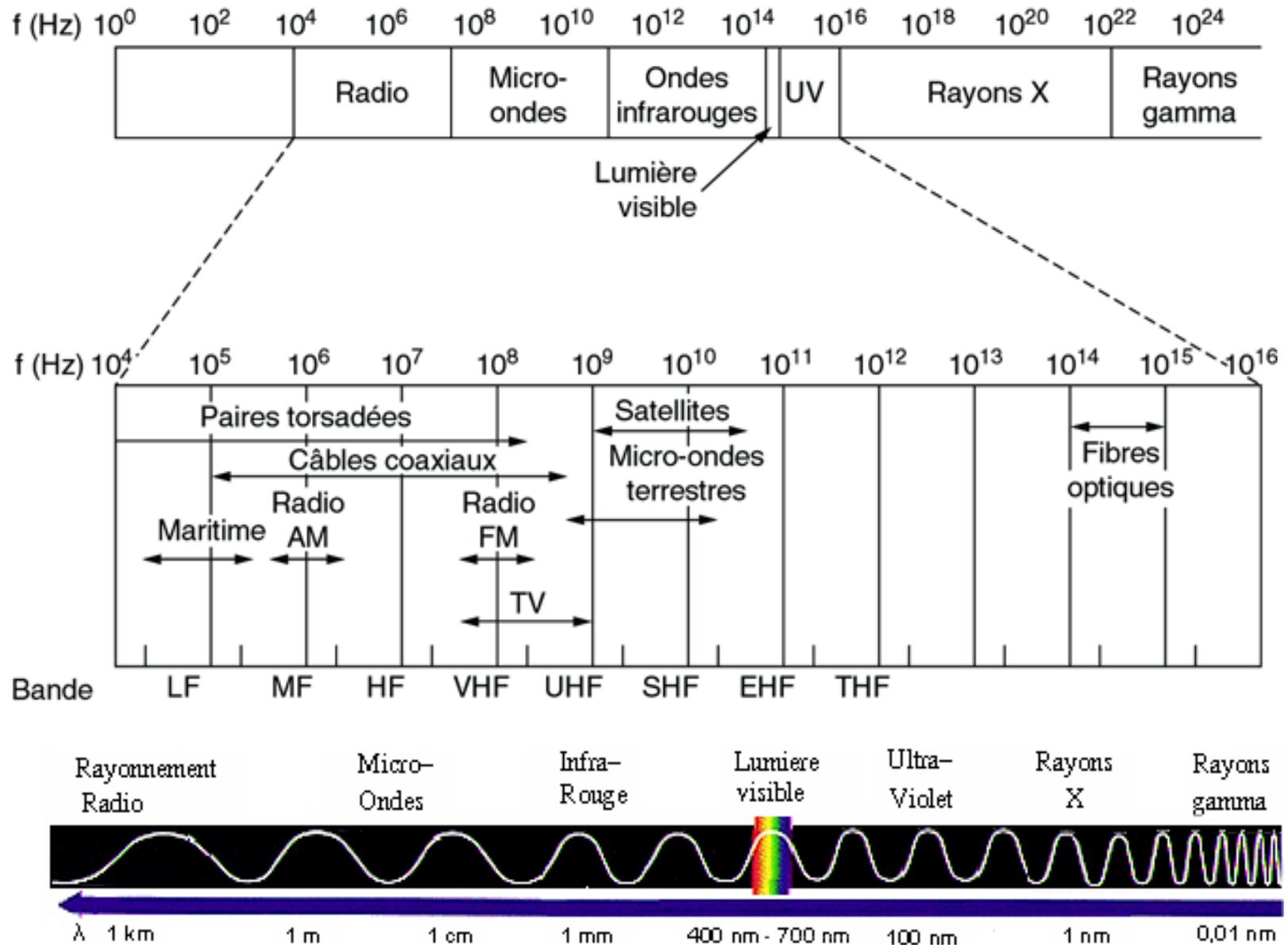
(b)

Visible Light Communication



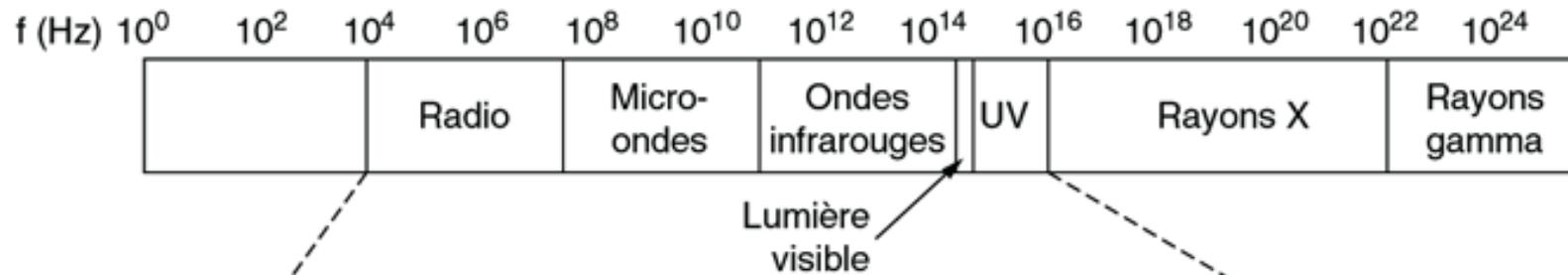
Auteur: C. Pham, Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)

Le spectre électromagnétique

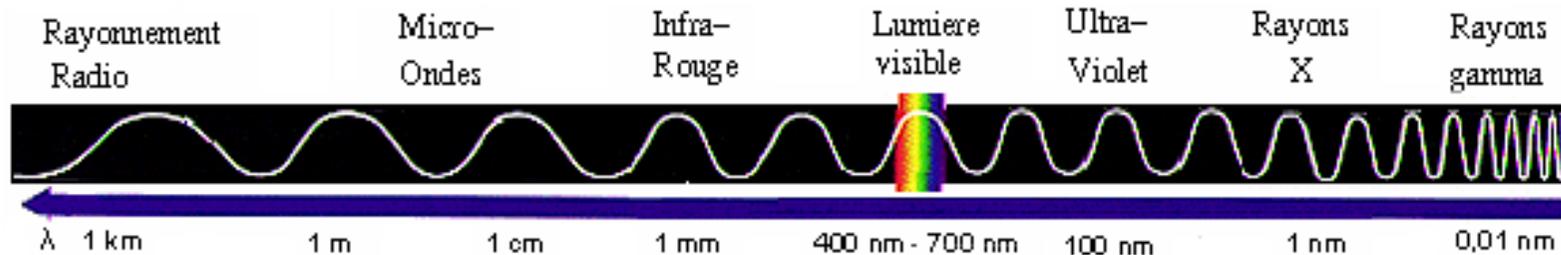
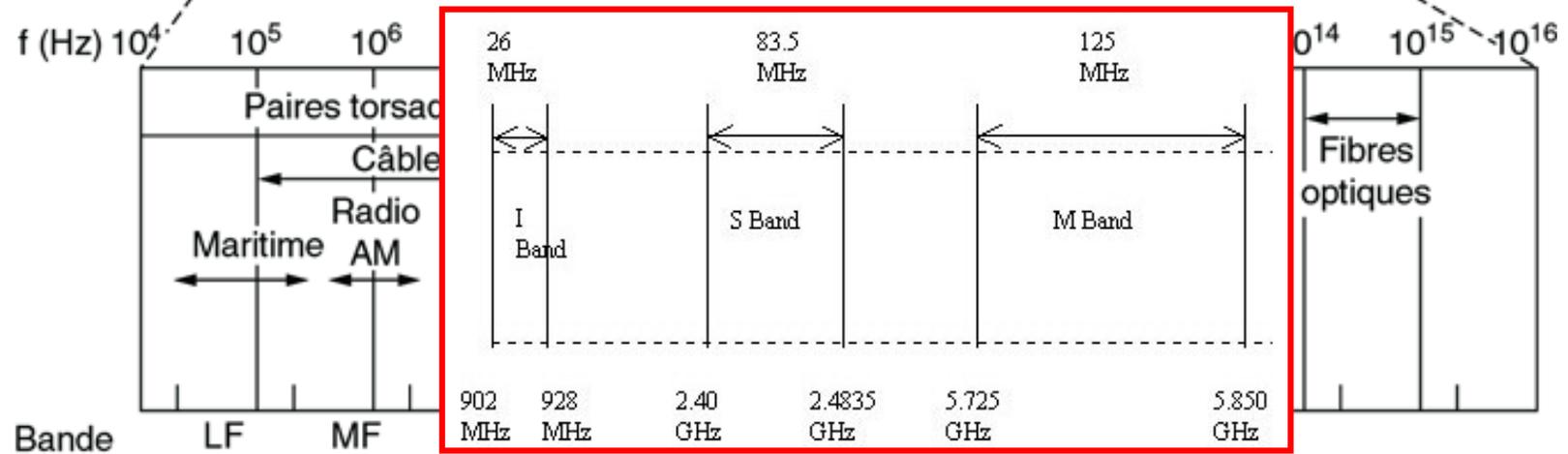


Auteur: C. Pham, Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)

Le spectre électromagnétique

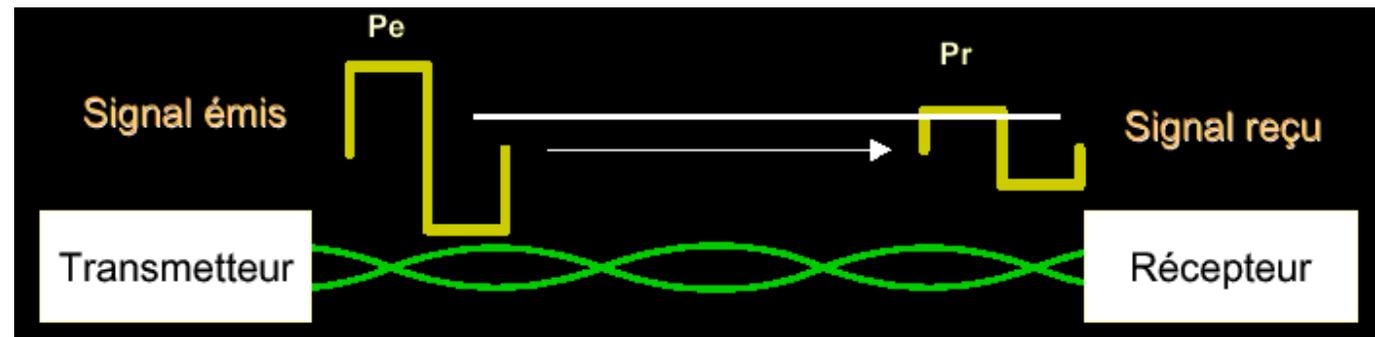


Les bandes ISM



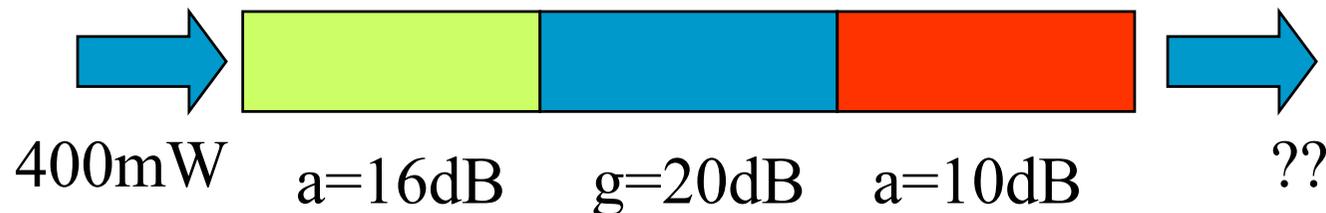
Auteur: C. Pham, Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA)

Phénomènes indésirables (1)



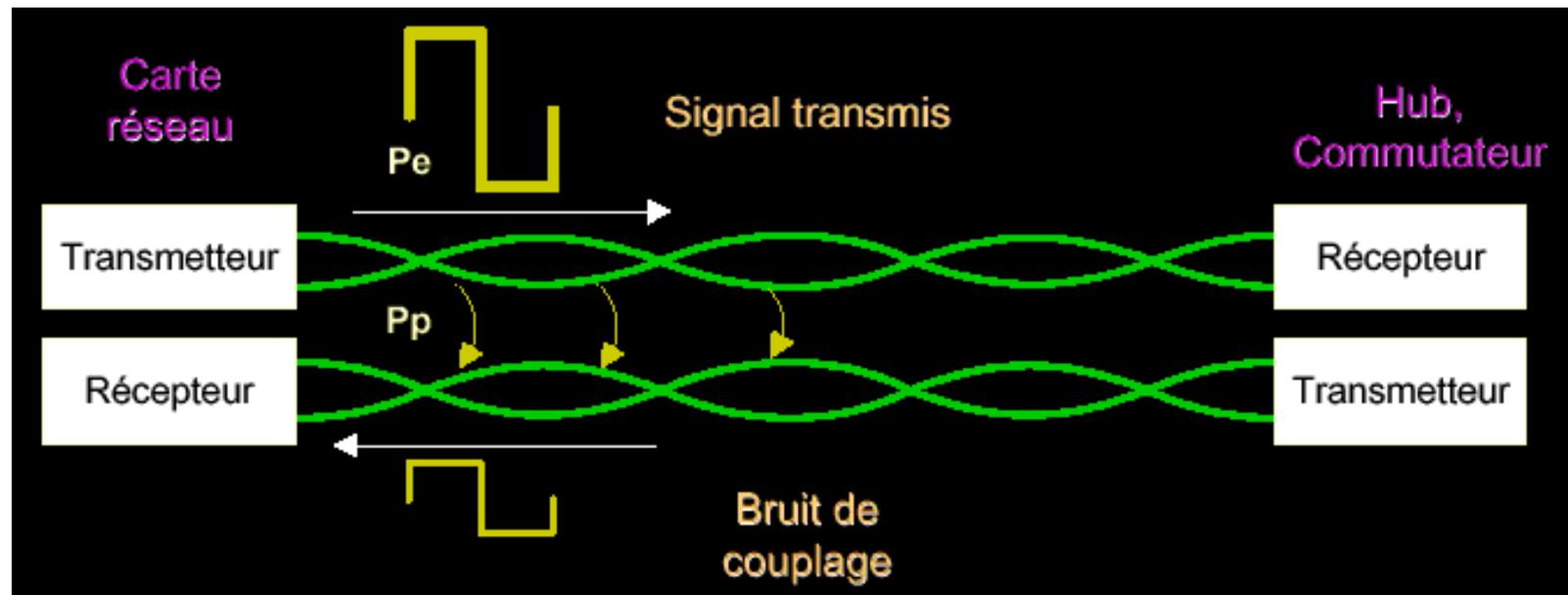
■ Atténuation

- affaiblissement de l'amplitude du signal, en fonction de la distance généralement. L'atténuation augmente quand la fréquence augmente.
- Atténuation = $10\log_{10}(P_t/P_r)$ (en dB), P_i en watts (-3db≈moitié)
- ➡ Gain = $10\log_{10}(P_r/P_t)$
- si plusieurs sections d'atténuation/gain différents, on peut les sommer:



Phénomènes indésirables (2)

- Perturbations entre 2 paires d'un même câble (NEXT: Near End Crosstalk)



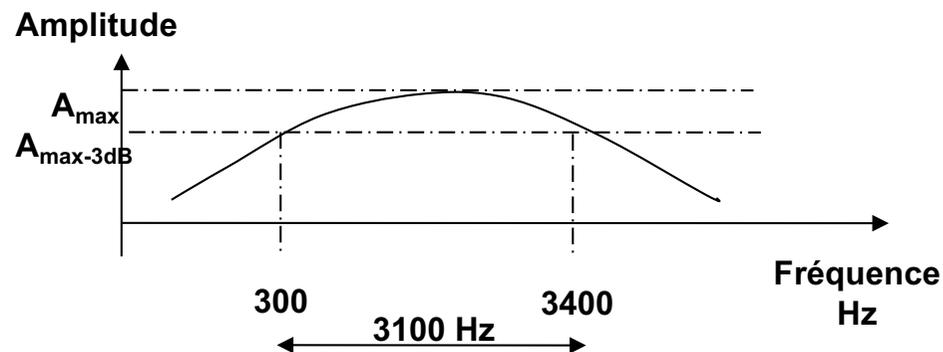
Phénomènes indésirables (3)

■ Bande passante limitée

- Pour un matériau donné les fréquences de 0 à f peuvent être raisonnablement véhiculées sans subir de distorsion trop grande. C'est la bande passante **$W = F_{\max} - F_{\min}$ (en Hz)**
- Le spectre du signal à transmettre (éventuellement modulé) doit être compris dans la bande passante du support physique.

■ Exemples:

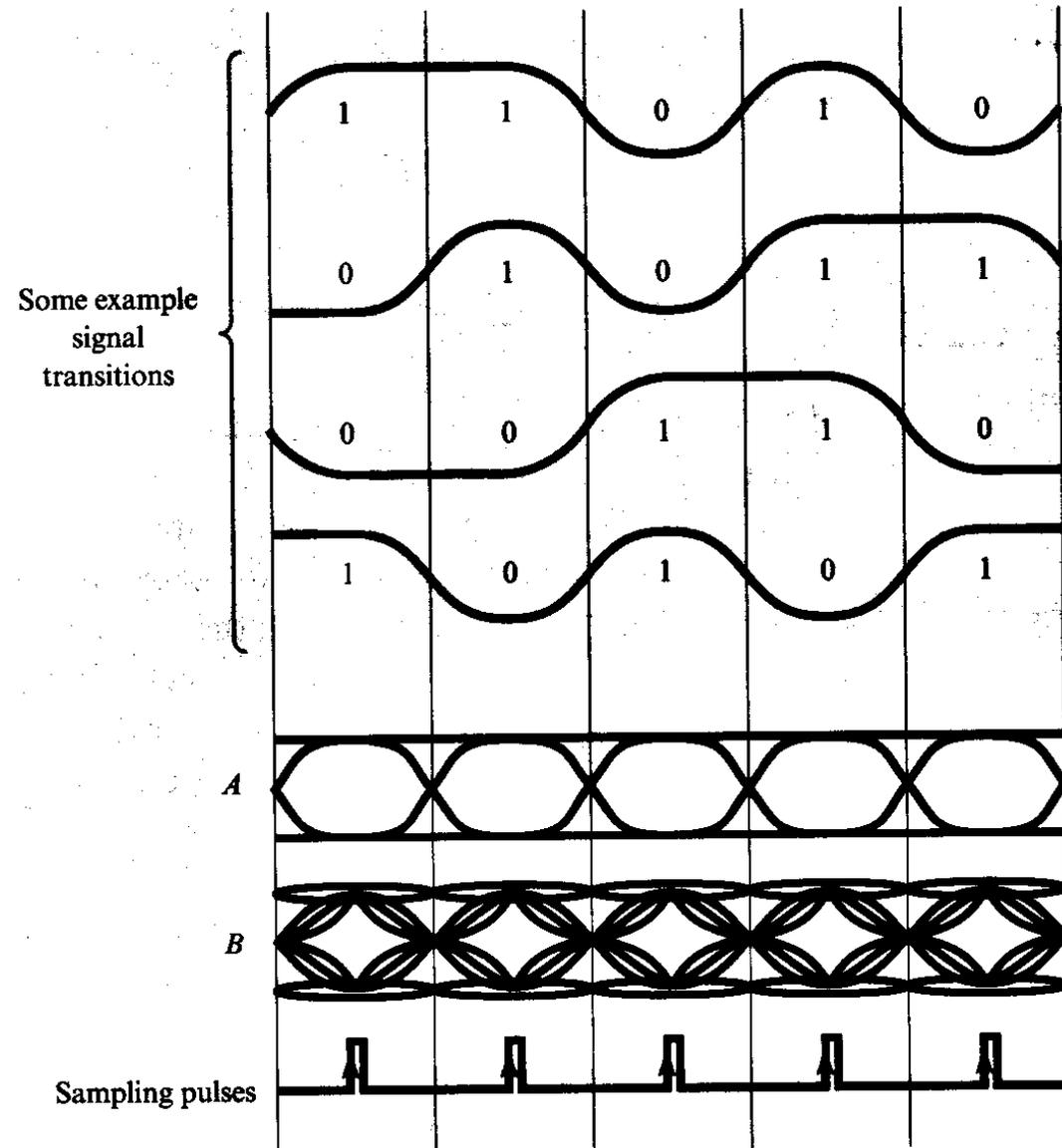
- l'atmosphère élimine les U.V.
- l'oreille humaine est sensible dans la bande 20 Hz-20 KHz
- Réseau téléphonique commuté (RTC)



Phénomènes indésirables (4)

Distorsions temporelles

- La vitesse de propagation d'un signal sinusoïdale varie en fonction de la fréquence.
- Les composantes d'un signal périodique n'arriveront donc pas en même temps.
- ➔ interférence entre symboles
– eye diagram



Phénomènes indésirables (5)

■ Bruit

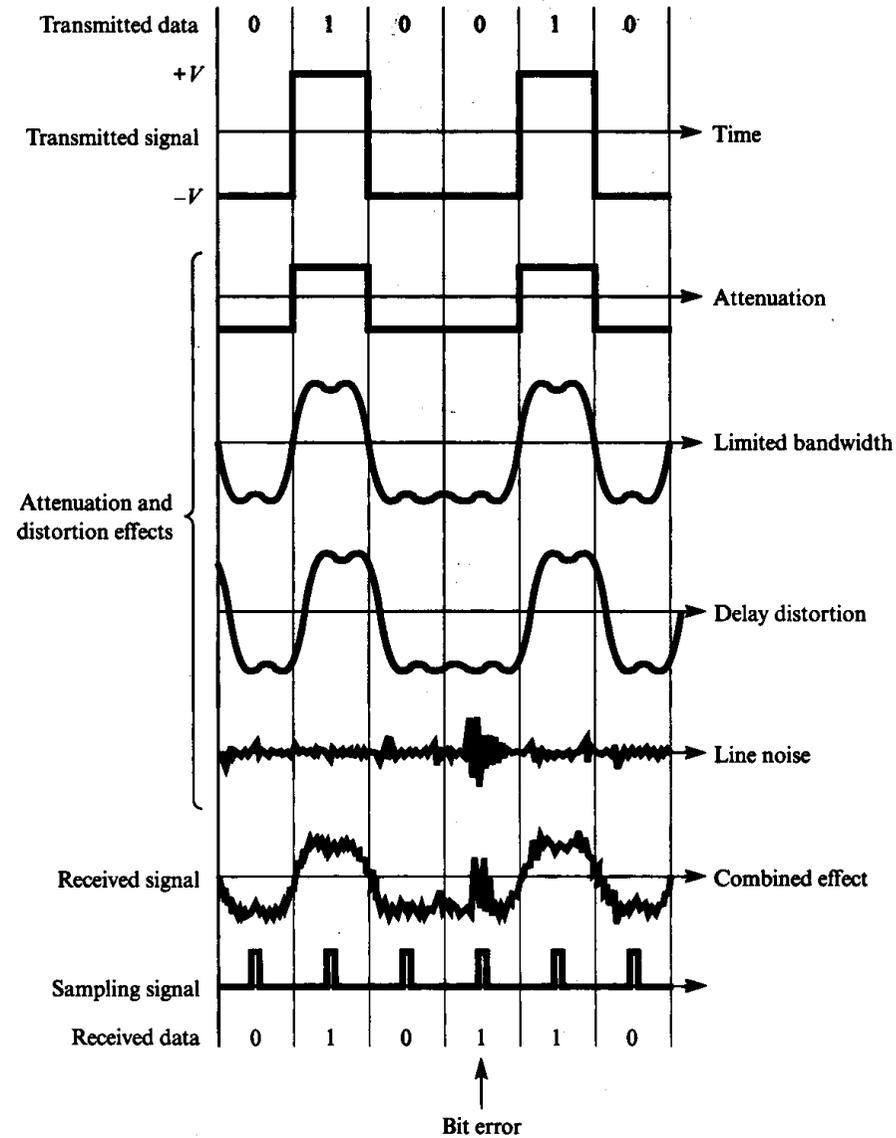
- émetteur du signal ;
- media de transmission ;
- perturbation atmosphérique

■ Chaque support introduit des perturbations électriques qui font que même en l'absence de signal, il y a des signaux parasites. C'est le bruit de la ligne.

- Bruit thermique = agitation thermique des électrons (source de bruit la plus courante)
- Diaphonie = influence mutuelle entre deux signaux utiles mais sur des conducteurs voisins.

■ On utilise le rapport S/N (signal reçu à bruit, SNR) en le caractérisant par $SNR=10\log_{10}(S/N)$ dB

Ce qui en résulte...



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

Informations analogiques et numériques

■ Analogique

- En analogique, les informations sont représentées par des niveaux de valeurs continus, proportionnels à la valeur de l'information. La transmission de ces informations se fait directement sur le support physique. Ex: Micros, photographie sur négatif.

■ Numérique

- Seulement un nombre faible de niveaux est utilisé. On doit d'abord échantillonner le signal analogique pour obtenir une représentation numérique. On transmet alors ces échantillons sur le support physique en utilisant le codage binaire pour n'utiliser que les valeurs pré-définies de voltages. Ex. +5 volts et -5 volts pour les 1 et les 0.

■ Question: Le télégraphe est-il un système analogique ou numérique?

Avantages et inconvénients

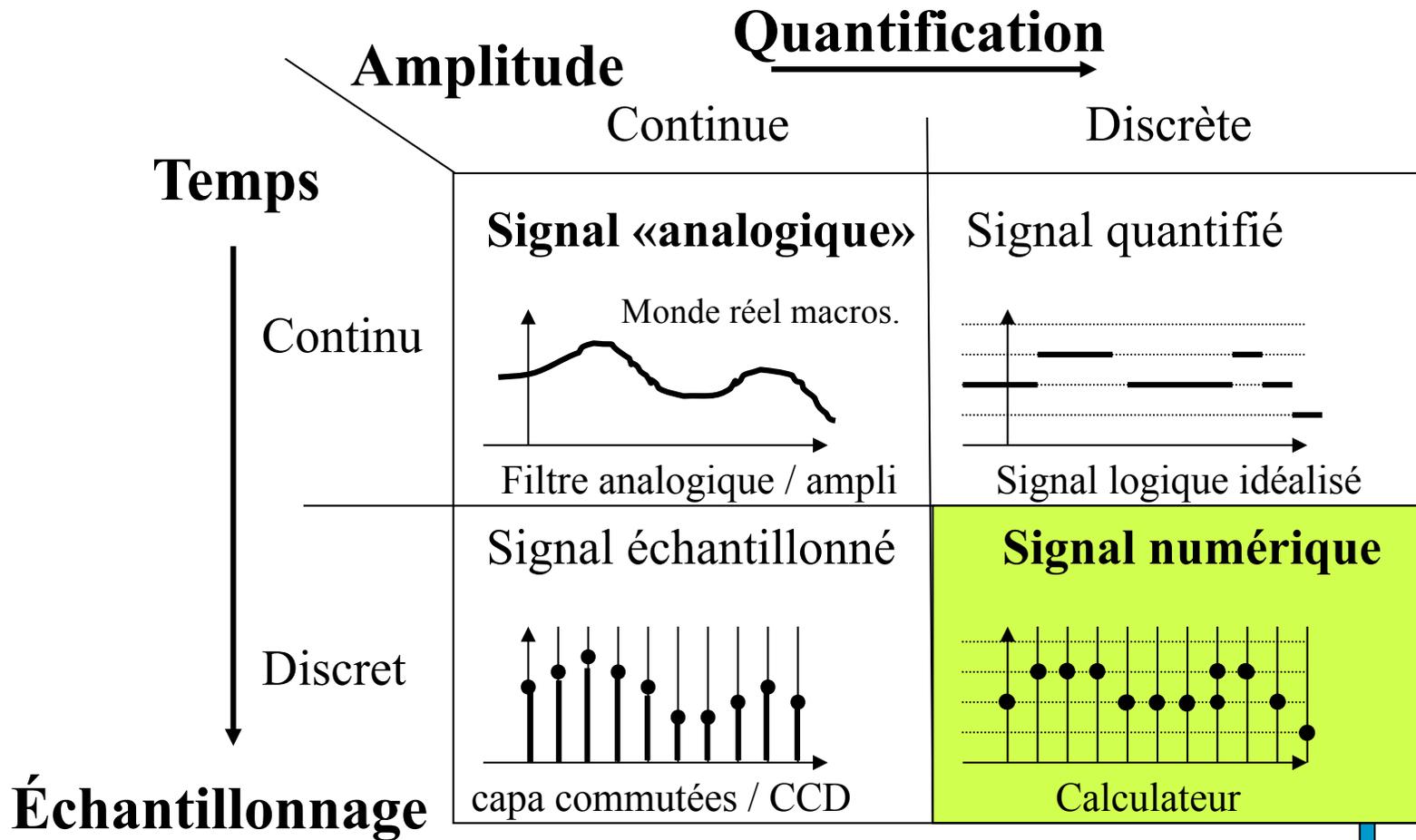
■ Analogique

- Informations complètes, pas de perte dues à l'échantillonnage.

■ Numérique

- Facilité de régénérer le signal, de le retravailler.
- Détection et corrections des erreurs possibles.
- Possibilité de mixer plusieurs types de données (voix, images, données...)
- Des débits plus élevés peuvent être obtenus avec les infrastructures existante.

Numérisation / discrétisation

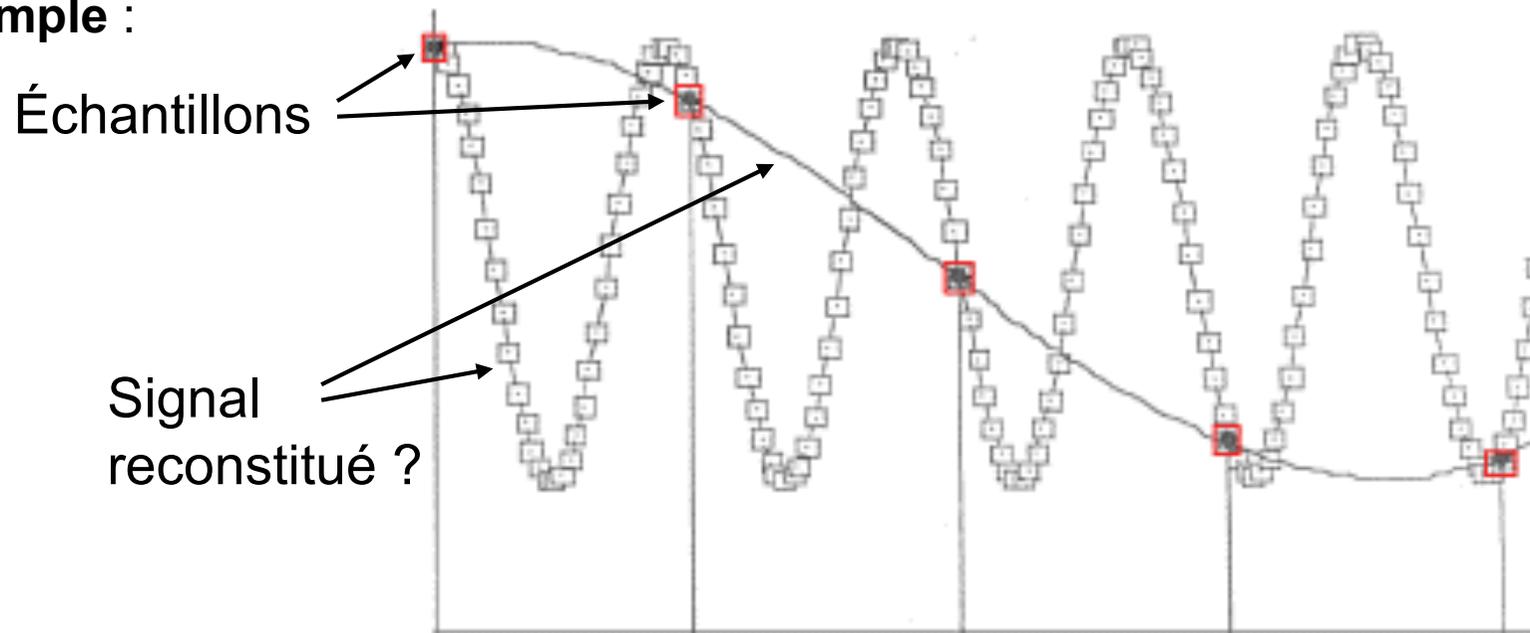


Il n'y a que dans ce cas que l'on peut associer un nombre entier au signal

Échantillonnage : Théorème de Shannon

Théorème De Shannon: $F_e > 2 \times F_{\max}(\text{Signal})$

Exemple :



Un signal incorrectement échantillonné
ne pourra pas être reconstitué

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?
- $D=R_m \cdot \log_2 V$

Débit maximum d'un canal de transmission

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

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

si le signal comporte V niveaux significatifs (Valence).

- Exemple: Pour un canal sans bruit dont la bande passante est de 3000 Hz qui ne peut transmettre qu'un signal binaire, $D_{\max} = 6000$ bit/s.
- 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):

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

Transmission entre équipements voisins

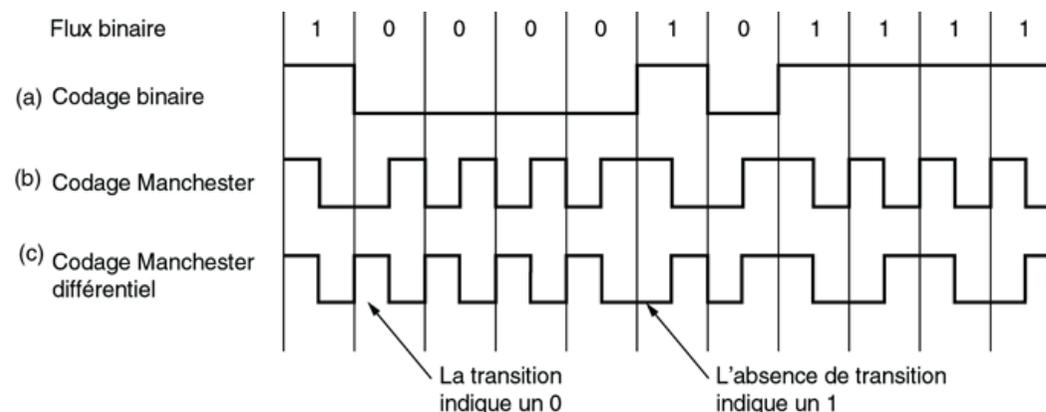


Canal de Transmission:
(ou support physique)
Coaxial, Fibre optique ...

ETTD :
*Equipement Terminal de
Transmission de Données*

Transmission en bande de base

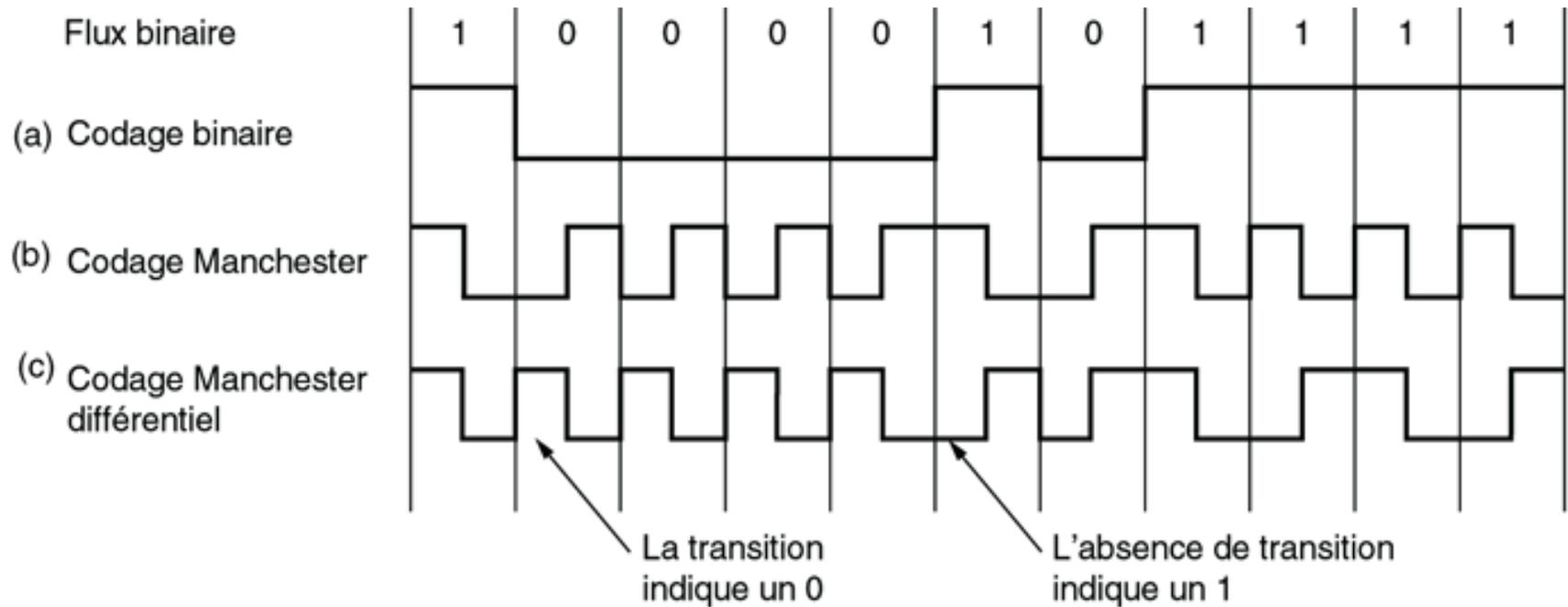
- En bande de base, les 0 et les 1 binaires sont directement représentés par des valeurs de tensions. L'avantage est la simplicité, mais les distances sont limitées à quelques kilomètres.
 - **NRZ**: les 1 sont codés par une tension positive, les 0 par l'opposé. Pas d'horloge véhiculée, problème de synchronisation.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

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

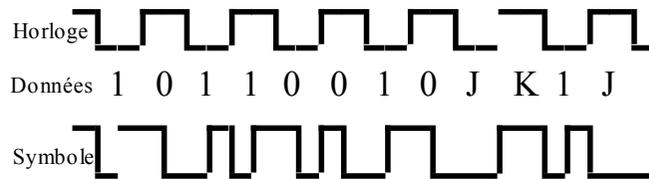
Exemple de codage en base de base



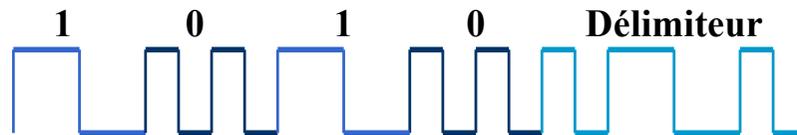
© Pearson Education France

Autres exemples de codages en bande de base

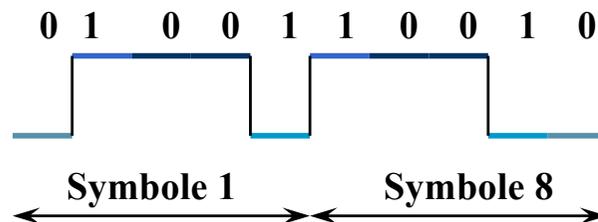
Codage "JK"



Carrier Band



Codage 4B/5B (FDDI)



– Manchester avec "non_data"

- Token Ring
- Délimiteurs J (bas) et K (haut)

– "bande porteuse"(carrier band) = MFM modulation de fréquence modifiée)

- MiniMAP

– Codage de bloc $x\text{B}/y\text{B}$

- FDDI, FastEthernet, 100VG-AnyLAN, etc.

- x bits de données sur y signaux **par table**

- 0 à F - "0" et "1" logiques
- Idle, Halt, Quiet
- Délimiteurs J,K,L,T

- NRZI (inversé)

- un zéro provoque un changement
- que donne la séquence 10011101?

Exemple, 4B/5B (FDDI)

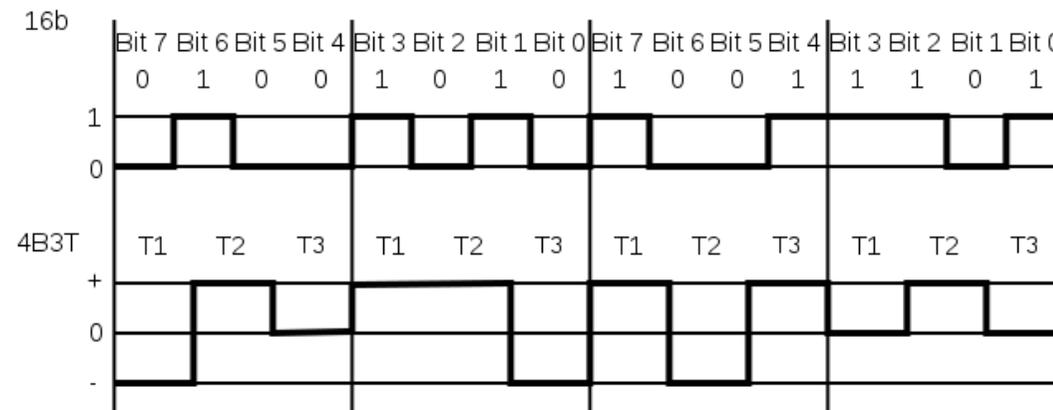
- Chaque groupe de 4 bits est transformé en un groupe de 5 bits avec un encodeur ➔ pas plus de deux 0 de suite.
- Ensuite en code en NRZI (fibre) ou MLT-3 (cuivre)
- On peut ajouter des symboles en plus

IDLE	11111
J	11000
K	10001
T	01101
R	00111
S	11001
QUIET	00000
HALT	00100

0000	11110
0001	01001
0010	10100
0011	10101
0100	01010
0101	01011
0110	01110
0111	01111
1000	10010
1001	10011
1010	10110
1011	10111
1100	11010
1101	11011
1110	11100
1111	11101

Type mBnL

- m bits représentés par n modulations à L niveaux
- Ex:
 - 4B3T ➔ 4 bits représentés par 3 modulations à 3 niveaux (T comme *ternary*)
 - 8B6T ➔ 8 bits représentés par 6 modulations à 3 niveaux
- 3 niveaux : + (positive pulse) , 0 (no pulse), - (negative pulse)
- On obtient ainsi une réduction de 1/4 sur le débit en bauds avec 4B3T.

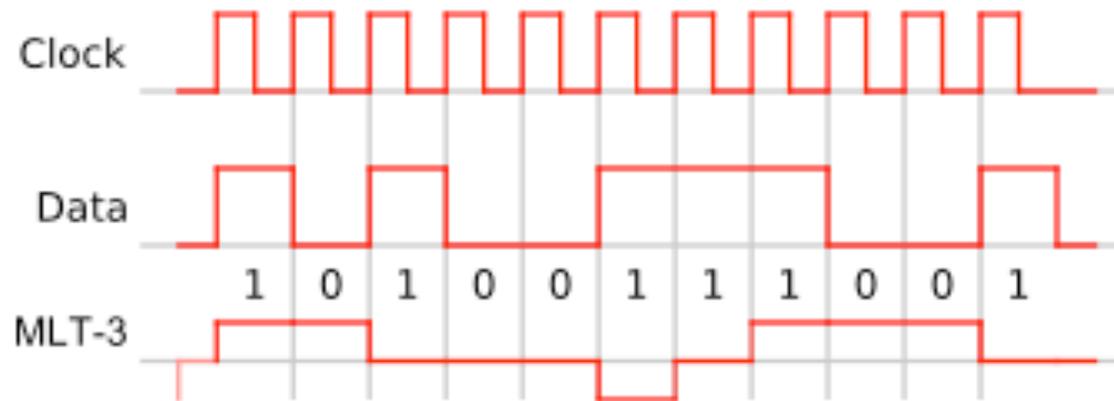


4B3T

Ternary	Binary	Ternary	Binary	Ternary	Binary
0 0 0	N/A	- 0 0	0101	+ - -	1010
+ 0 +	0000	- + +	0110	+ 0 -	1011
0 - 0	0000	- - +	0110	+ + +	1100
0 - +	0001	- 0 +	0111	- + -	1100
+ - 0	0010	+ 0 0	1000	0 + 0	1101
0 0 +	0011	0 - -	1000	- 0 -	1101
- - 0	0011	+ - +	1001	0 + -	1110
- + 0	0100	- - -	1001	+ + 0	1111
0 + +	0101	+ + -	1010	0 0 -	1111

MLT-3

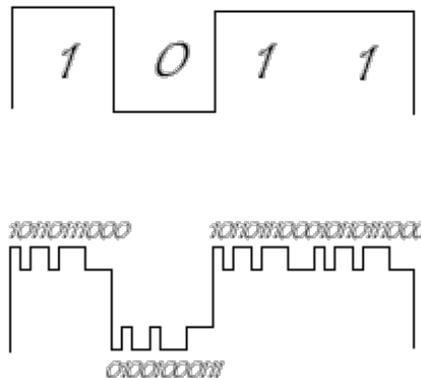
- **Multi-Level Transmit avec 3 niveaux**



- **Un signal MLT-3 cycle successivement aux niveaux de tension « -1 », « 0 », « +1 », etc. Il passe au niveau suivant de la séquence pour transmettre un bit à 1, et reste au même niveau pour transmettre un bit à 0.**
- **D'abord proposé pour FDDI cuivre, il est utilisé dans 100Base-TX (Ethernet cuivre)**

Chipping code: exemple 802.11 en DSSS

- 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

Transmission sur de plus longues distances

- **Pour les longues distances,**
 - on utilise le large bande qui utilise les théories de Fourier sur la décomposition d'un signal périodique en sommes de sinusoïdes et cosinusoides.
- **La bande passante limite directement le débit que l'on peut injecter sur un support.**
 - Le théorème de Nyquist (en 1924) stipule pour un support sans bruit la relation suivante: Débit max = $2H \log_2 V$ bits/s
- **Un canal de $H=3\text{KHz}$ ne pourra donc pas véhiculer plus de 6000 bits/s ($V=2$ pour des niveaux binaires).**

Nécessité d'un modem



ETCD :
*Equipement Terminal de
Circuit de Données*

Modem :
Modulateur / Démodulateur

Canal de Transmission :
Ligne téléphonique

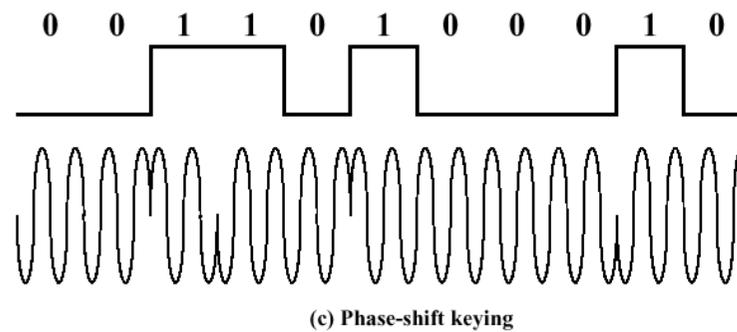
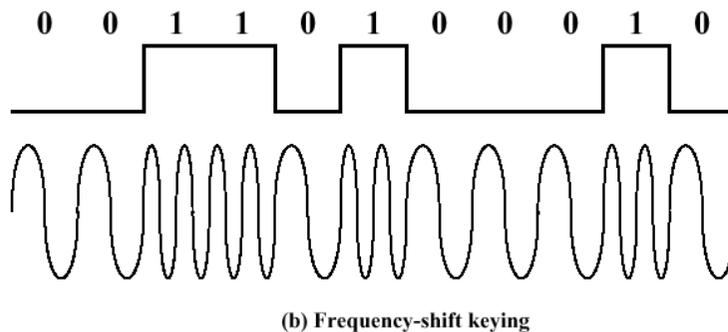
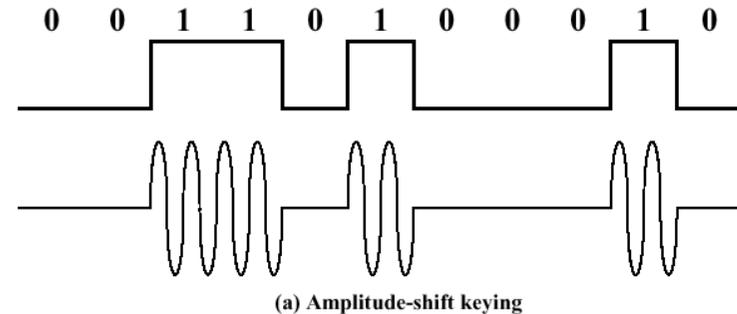
Modulation

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

Transmission en large bande (broadband)

■ 4 types de modulation

- Amplitude (ASK)
- Fréquence (FSK)
- Phase (PSK)
- combiné amplitude+phase (QAM)

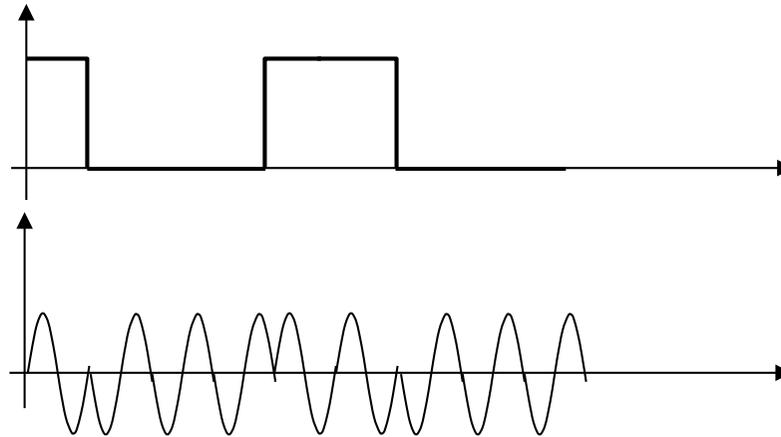


■ Avantages

- Plusieurs canaux de transmission sur le même support
 - de Données
 - de Signaux vidéo analogiques

Modulation de phase

- PSK: Phase Shift Keying
- Un déphasage \leftrightarrow une valeur du signal

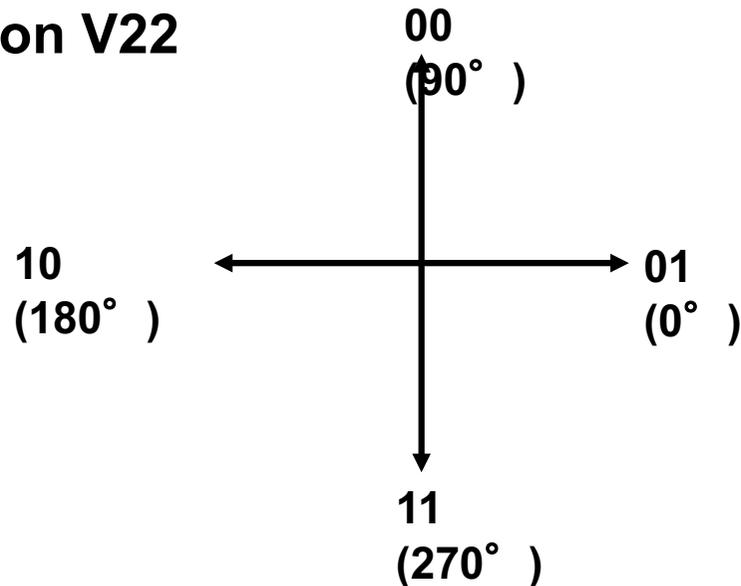


- Avec des codes à plusieurs bits, on peut augmenter le débit sans changer la fréquence de modulation.
- Les vitesses de transmission sont plus élevées qu'en modulation FSK pour la même bande passante
- Differential PSK: déphasage obligatoire, relatif. Ex: $90^\circ = 0$, $270^\circ = 1$

Modulation de phase

- Exemple : avis V22 du CCITT (1200 bauds) - phase codée sur 2 bits

Constellation V22

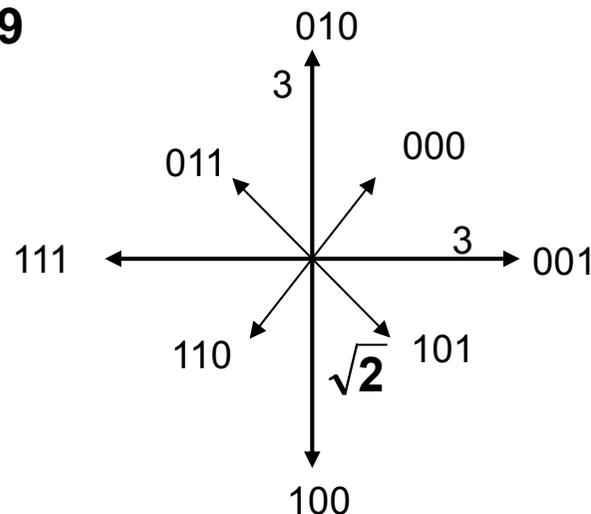


- Nombre de déphasages limité par le bruit pour retrouver le bon signal

Modulation combinée

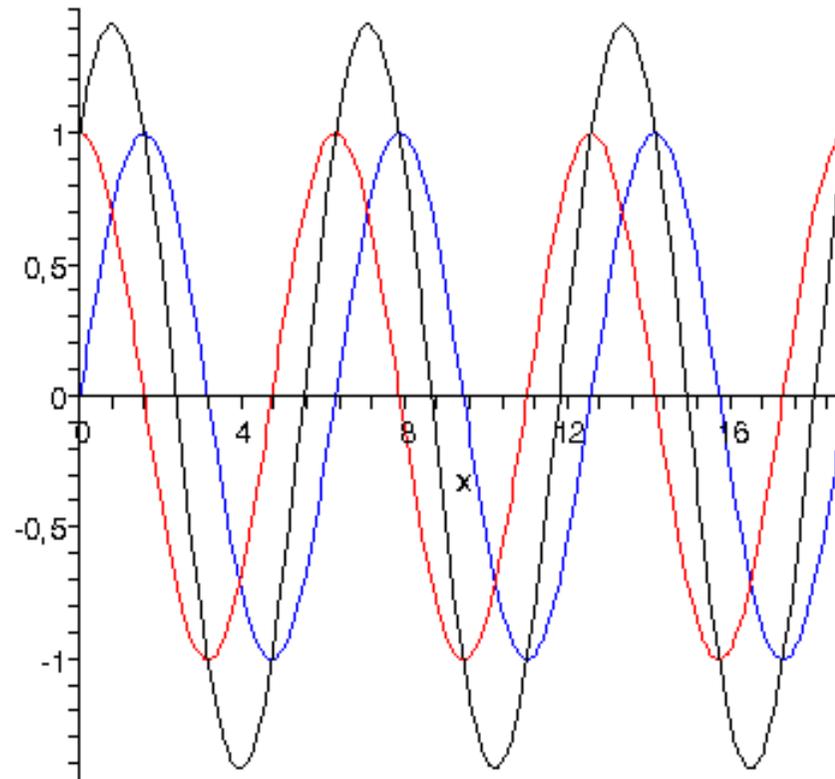
- Combiner plusieurs types de modulation parmi les trois types de modulation décrits auparavant.
- Les normes actuelles utilisent des combinaisons des modulations de phase et d'amplitude.
- Exemple : Modulation V29 à 7200 bits/s
- 8 états de phase et 2 valeurs d'amplitude

Constellation V29



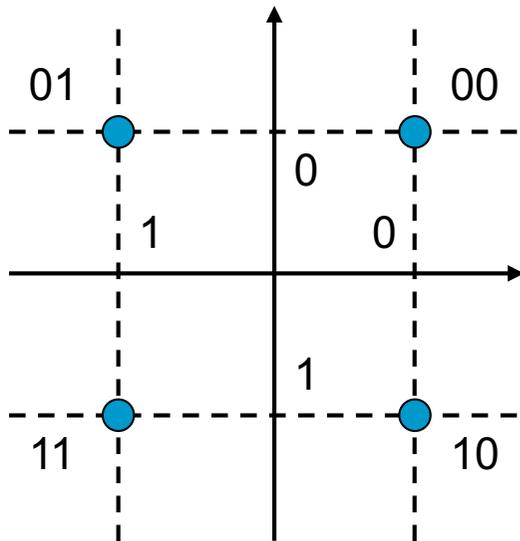
Modulation combinée en quadrature

- **Porteuses en quadrature : addition de deux porteuses de fréquence f_0 en quadrature, on obtient une seule porteuse, toujours de fréquence f_0**

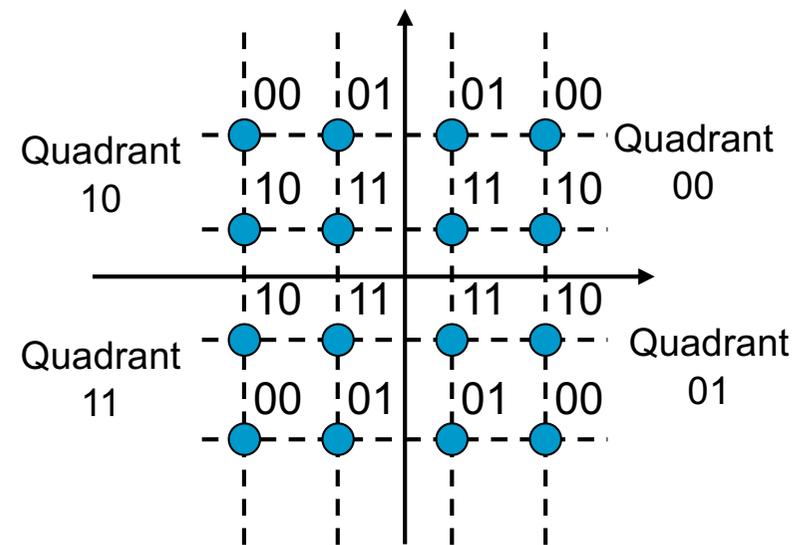


Modulation combinée en quadrature

Modulation de phase
4 états (2 bits)



Quadrature Amplitude Modulation
QAM 16
16 états (4 bits)



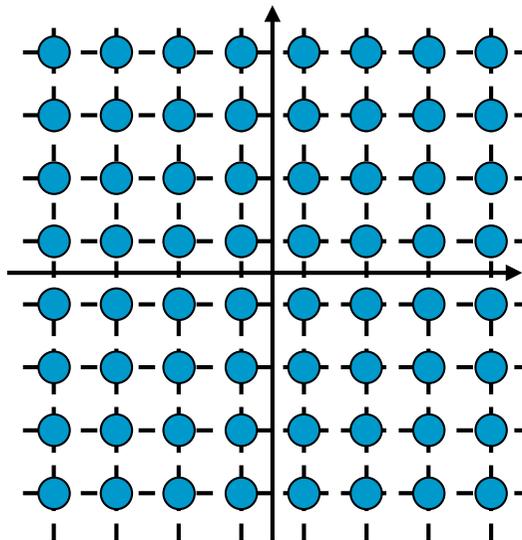
Modulation combinée en quadrature

Quadrature Amplitude Modulation

QAM 64

64 états (6 bits)

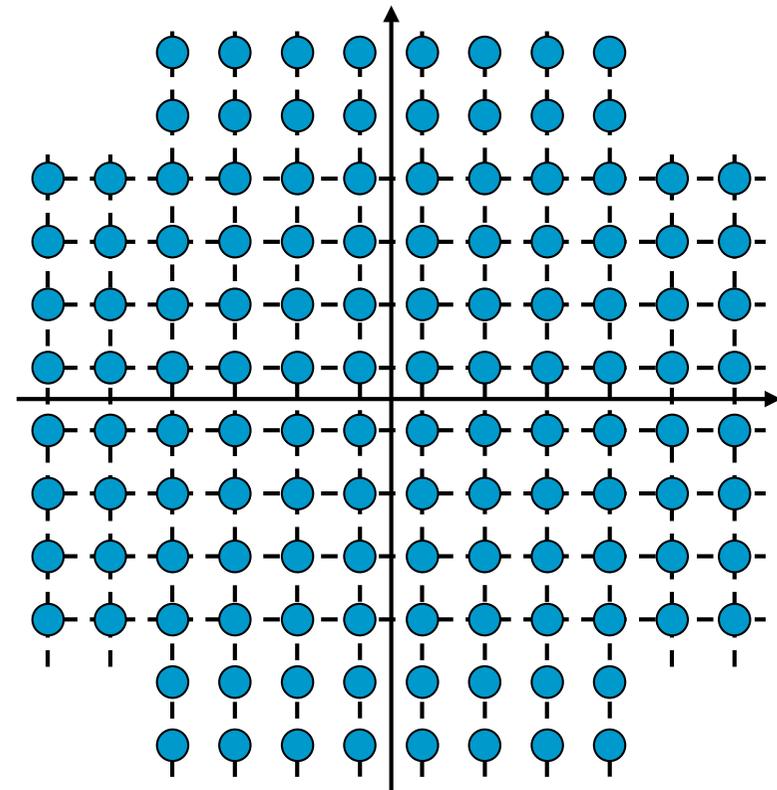
3G HSPA, TNT, ...



Quadrature Amplitude Modulation

QAM 128

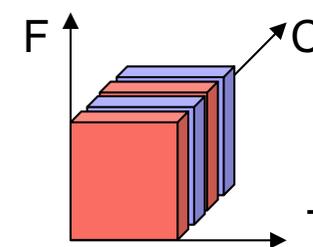
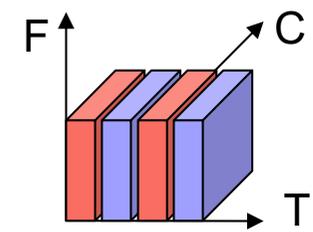
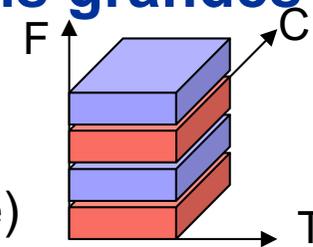
128 états (7 bits)



Multiplexage

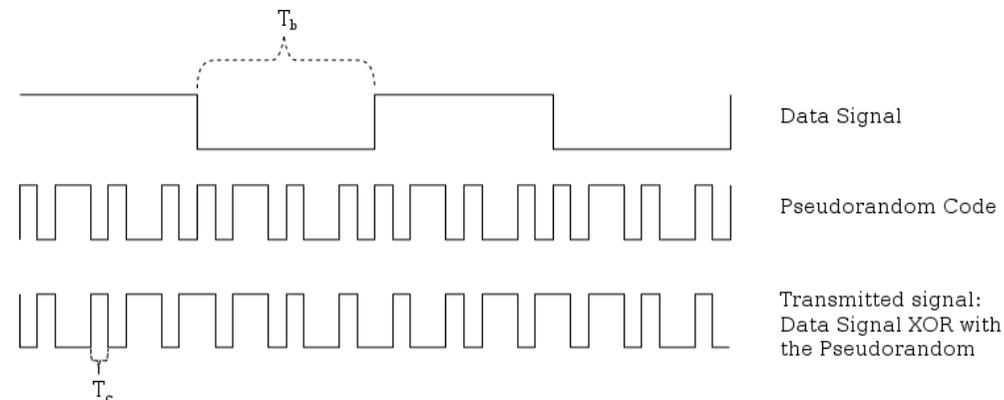
- **Objectif : optimiser l'usage des canaux de transmission pour un transit simultané du maximum d'informations \Rightarrow partage (multiplexage) du support physique de transmission entre plusieurs signaux.**
- **Ces techniques peuvent se classer en trois grandes catégories:**

- multiplexage fréquentiel :
 - MRF (Multiplexage par Répartition de Fréquence)
 - FDM (Frequency Division Multiplexing)
- multiplexage temporel :
 - MRT (Multiplexage à Répartition dans le Temps)
 - TDM (Time Division Multiplexing)
- multiplexage par code
CDM (Code Division Multiplexing)



CDMA (Code Division Multiple Access)

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

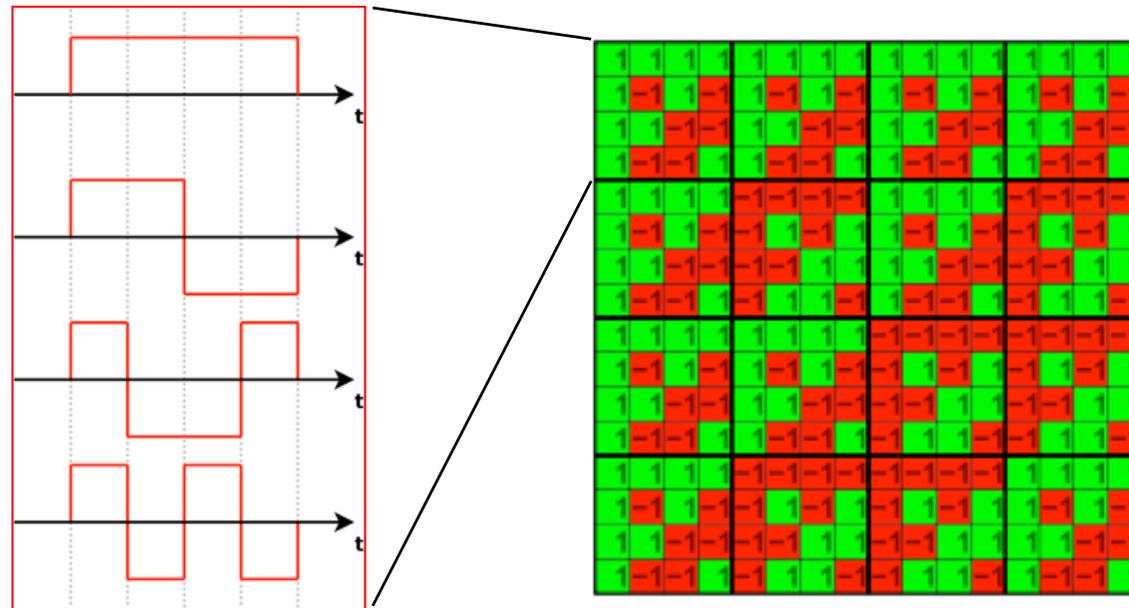


- Exploite les propriétés mathématiques entre les codes orthogonaux. 2 codes sont orthogonaux si le produit scalaire de leur vecteur associés est nul. $u = (a, b)$ and $v = (c, d)$ alors $u.v = a.c+b.d$
- Ex: $u=(1,1)$, $v=(1,-1)$

CDMA, suite

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

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



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

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

CDMA, exemple de codage

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

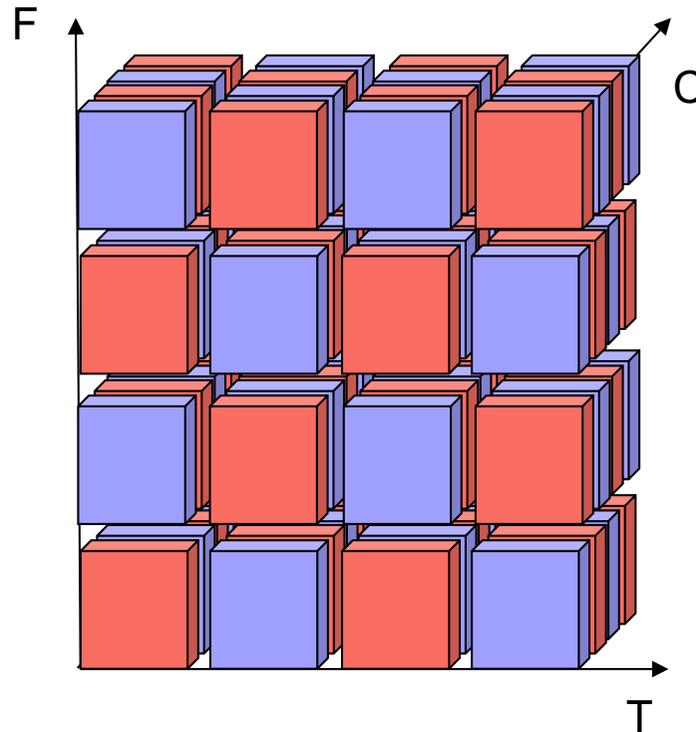
CDMA, transmission et décodage

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

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

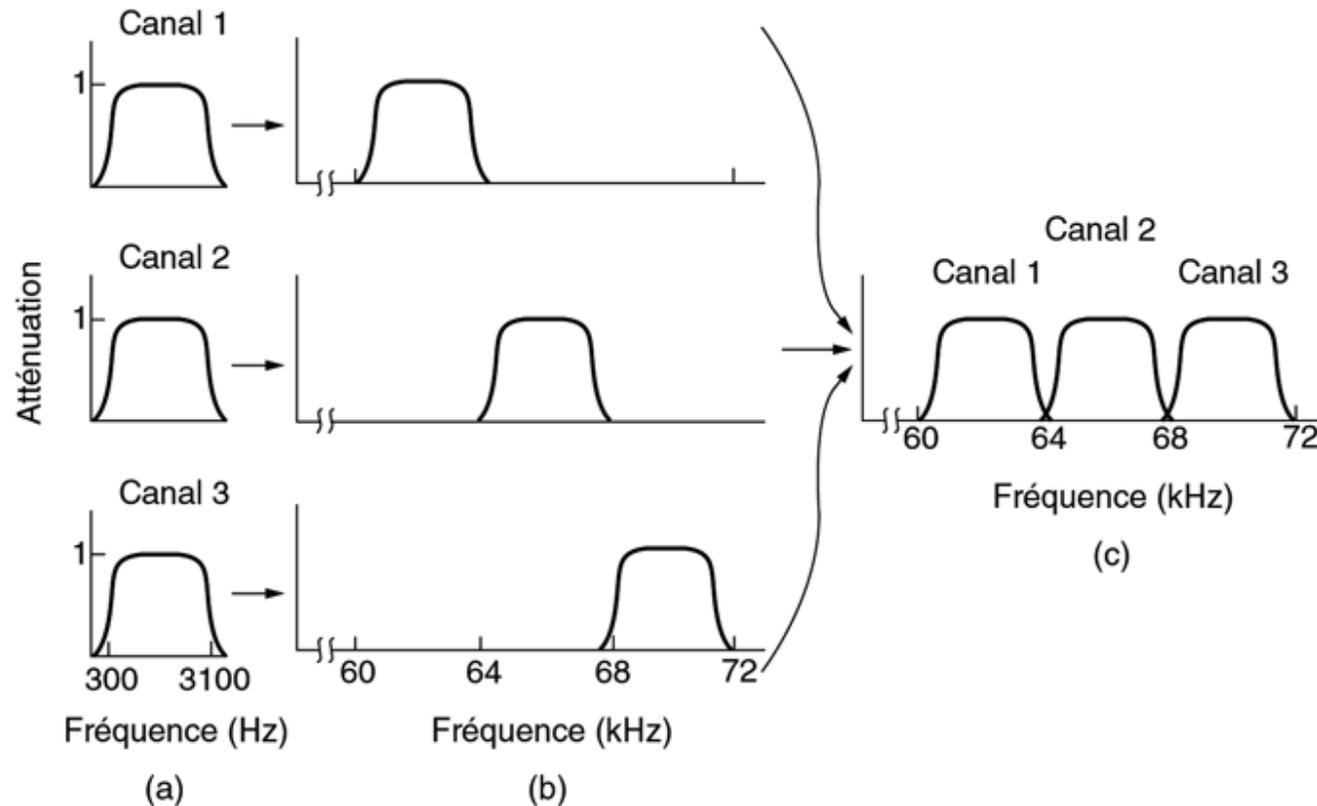
Multiplexage

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



Multiplexage en fréquence (1)

■ FDM: Frequency Division Multiplexing



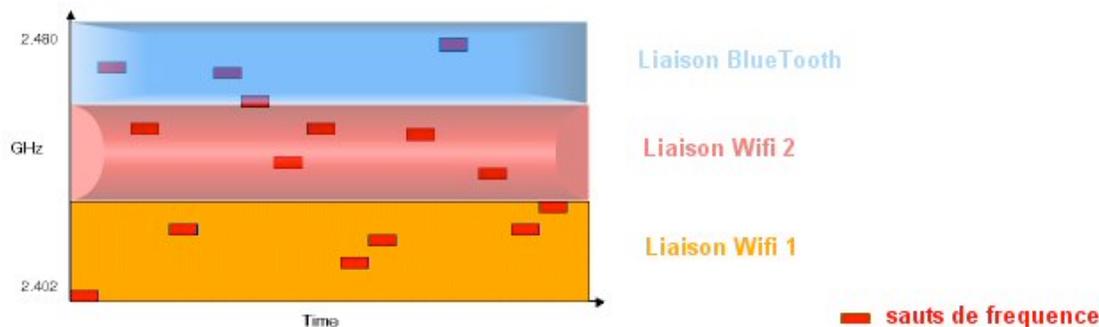
© Pearson Education France

Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

- **Etalement de spectre par saut de fréquence**
- **Découpe la bande de fréquence sous-canaux 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.**
- **Originellement été conçu dans un but militaire afin d'empêcher l'écoute des transmissions radio.**

FHSS, suite

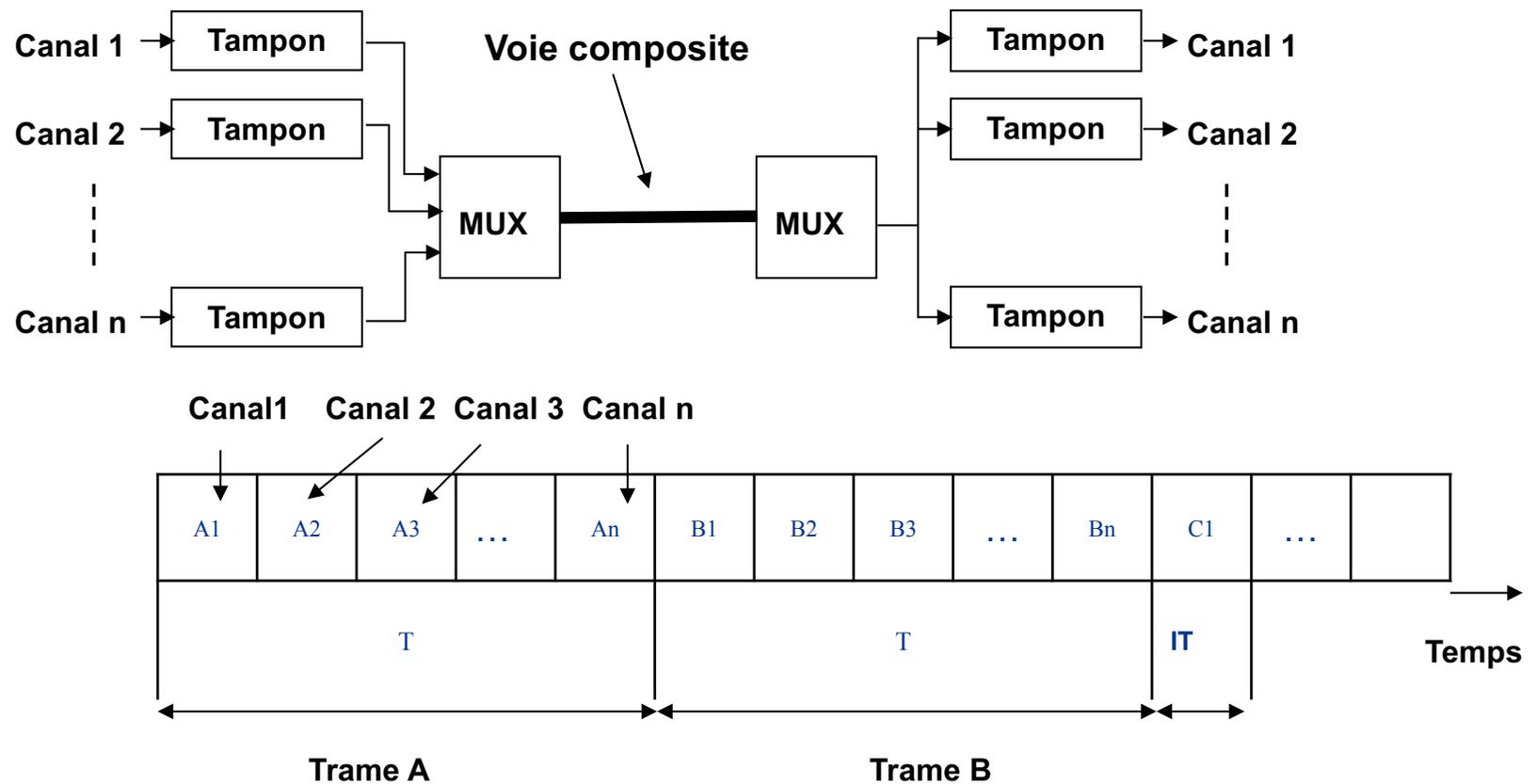
- Aujourd'hui les réseaux locaux utilisant cette technologie sont standards. La séquence de fréquences utilisées est connue de tous donc ne sert plus à la sécurisation des échanges.
- FHSS est utilisé dans 802.11 pour réduire les interférences entre les transmissions des diverses stations d'une cellule
- Plusieurs réseaux peuvent cohabiter à proximité sans interférer tant que leurs sauts de fréquence sont différents. En théorie, jusqu'à 15 réseaux différents peuvent cohabiter dans une même zone.



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

Multiplexage temporel

- TDM: Time Division Multiplexing
- Données 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

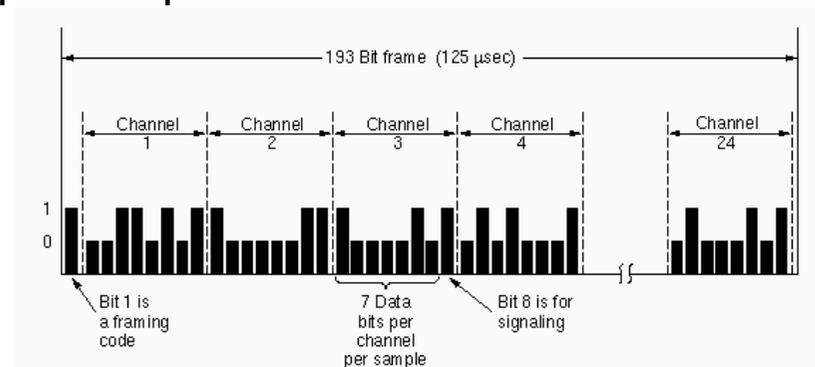
$$d = D/n$$

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

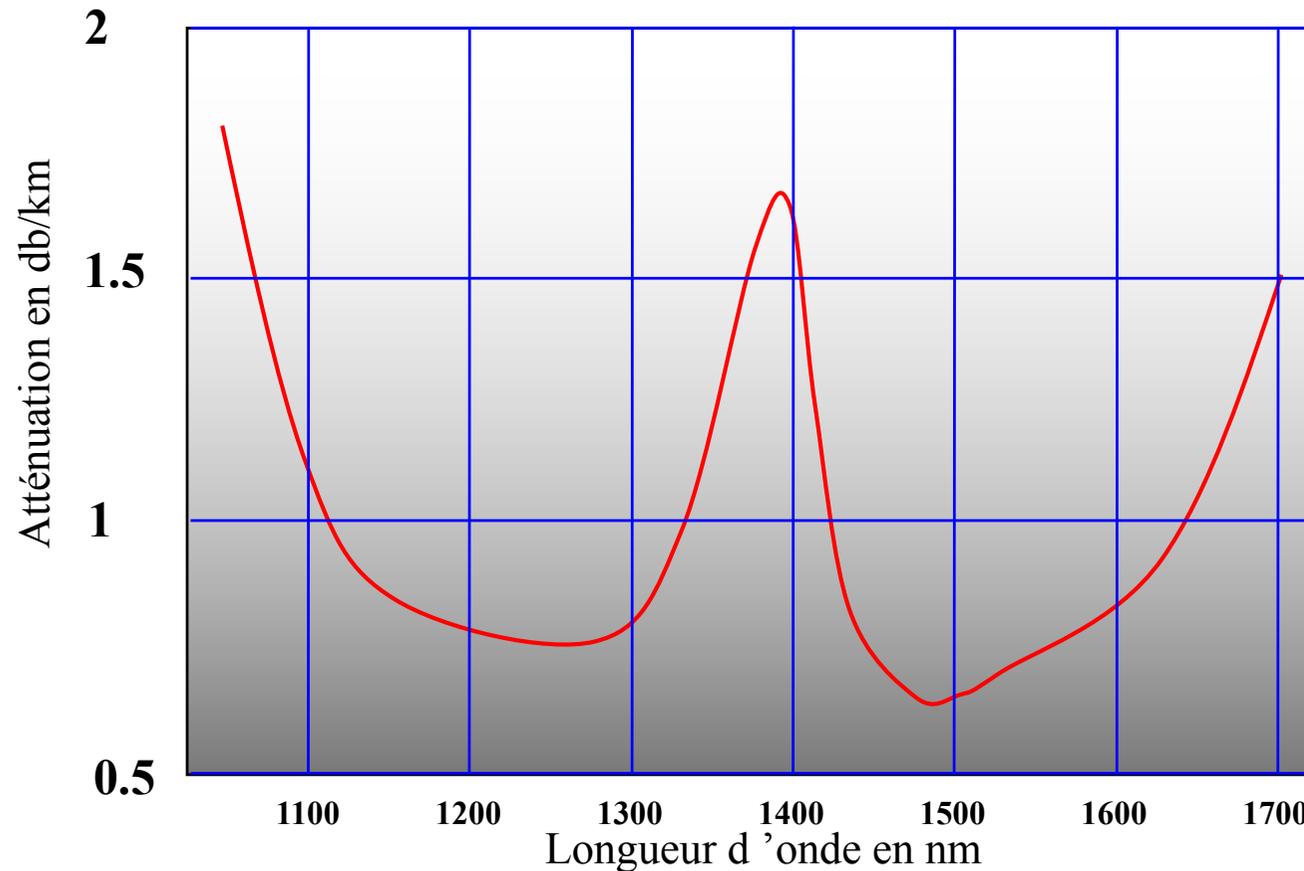
$$T = n \times IT$$

- Ex: Une ligne T1 groupe 24 canaux de communication

- Trame de 193 bits ($24 \times 8 + 1$) périodiquement émise
- Débit brut de 1.544 Mbits/s.



Le multiplexage sur fibre optique

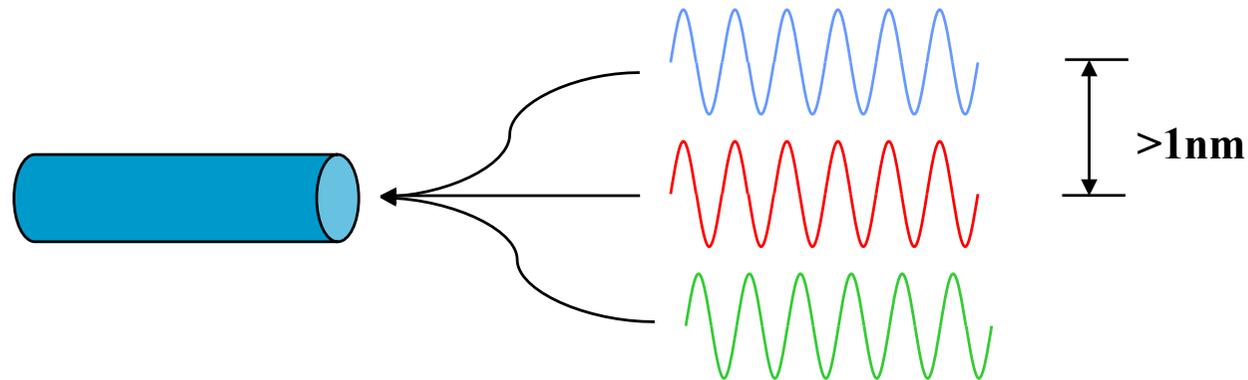


■ Wave-length Division Multiplexing

- mettre sur une même fibre plusieurs canaux de données, en utilisant différentes longueurs d'onde (couleurs).

Principes du WDM

WDM(Wavelength Division Multiplexing).



DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing).

