

La couche physique

- Qu'est-ce que cette couche spécifie ?
 - Caractéristiques électriques, mécaniques de la transmission. Aussi, le temps d'un bit ou symbole, la fréquence utilisée
- Qu'est-ce qu'elle fait ?
 - Envoyer des bits vite et avec la plus haute fiabilité possible étant donné les caractéristiques du support de transmission

Couche Physique

- Pour transmettre de l'information numérique (bits), il faut:
 - Un support de transmission ou médium
 - Un signal qui puisse se propager dans le support de transmission
- Exemples de supports de transmission
 - Câble coaxial, fibre optique, l'air
- Exemples de signaux
 - Courant et tension électrique, lumière, ondes radio

Media de transmission

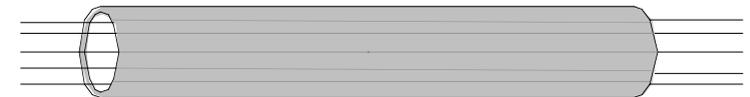
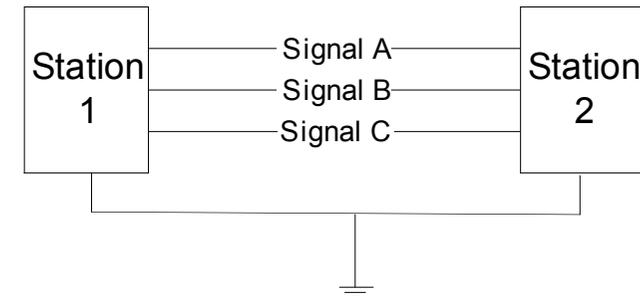
Médias principaux

- Ligne électrique
 - Équilibrée ou non équilibrée
 - Câble coaxial
- Fibre optique
 - Monomode ou multimode
- Ondes radio
 - Transmission par micro-ondes
 - Satellites

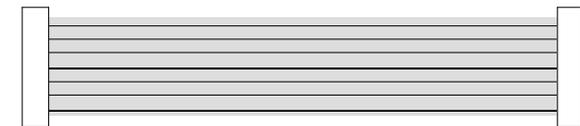
Ligne électrique

Ligne non équilibrée

- Utilise plusieurs fils pour les différents signaux mais **un seul fil comme voie retour**
- Très **sensible aux perturbations** électriques
- **Bon marché**
- Configuration:
 - Câble rond ou nappe
- Souvent utilisée pour les lignes série
- Débit: p.ex. **200 kb/s sur 15m**



a) Câble à lignes non équilibrées



b) Nappe à lignes non équilibrées

Paire torsadée

- Transmission équilibrée (ou différentielle)
 - Chaque signal à une voie retour séparée
 - Réduit les interférences entre les signaux

Paire torsadée

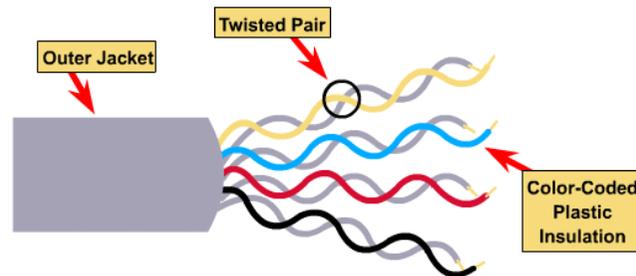


- Les deux fils d'une ligne sont enroulés de façon hélicoïdale
 - Réduit les interférences électromagnétiques
 - Utilisée dans les systèmes téléphoniques, les câbles LAN et le dernier km
- Débit: p.ex. 8 Mb/s sur 4 km (ADSL) ou 52 Mb/s sur 1.2 km (VDSL) ou 100 Mb/s sur 500 m (VDSL2)

Câbles à paires torsadées

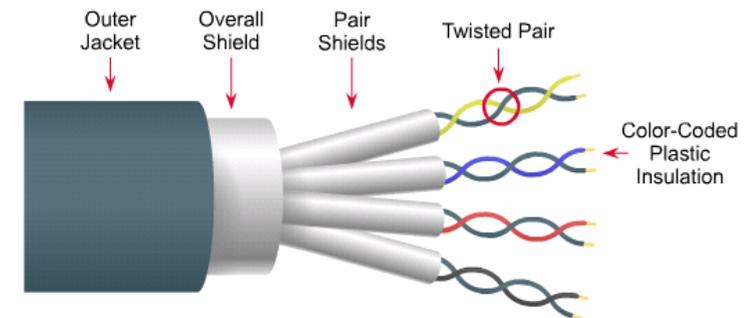
UTP (*Unshielded Twisted Pair*)

- 4 paires torsadées non écrantées
- Longueur jusqu'à 100 m
- **Avantages**: moins cher et plus flexible
- Différentes catégories:
 - Cat. 3: jusqu'à 10 Mb/s
 - Cat. 5: jusqu'à 100 Mb/s
 - Cat. 5e, 6: Gigabit-Ethernet
 - -Cat 7: 10-Gigabit-Ethernet



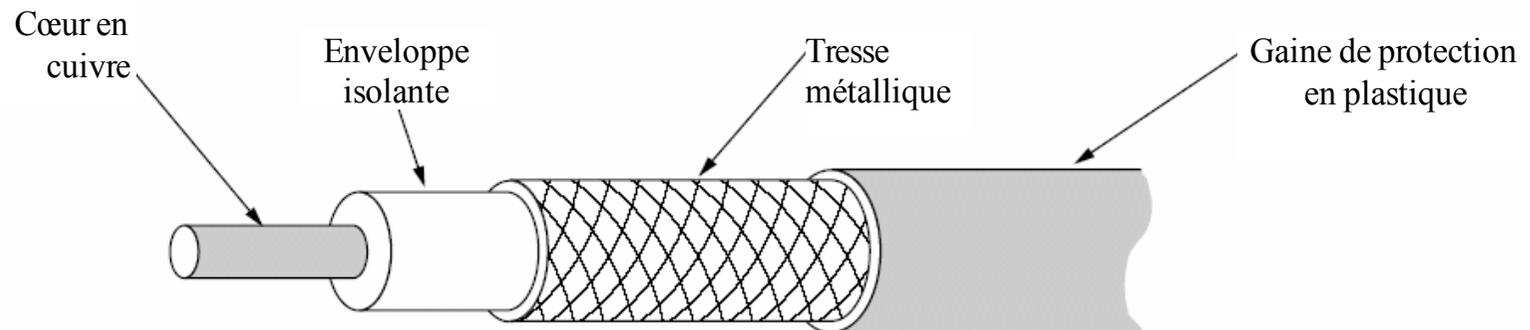
STP (*Shielded Twisted Pair*)

- Paires individuelles et câble complet sont écrantées
- Longueur jusqu'à 100 m
- Atténuation plus faible
- **Inconvénient**: cher et difficile à installer (mise à terre)



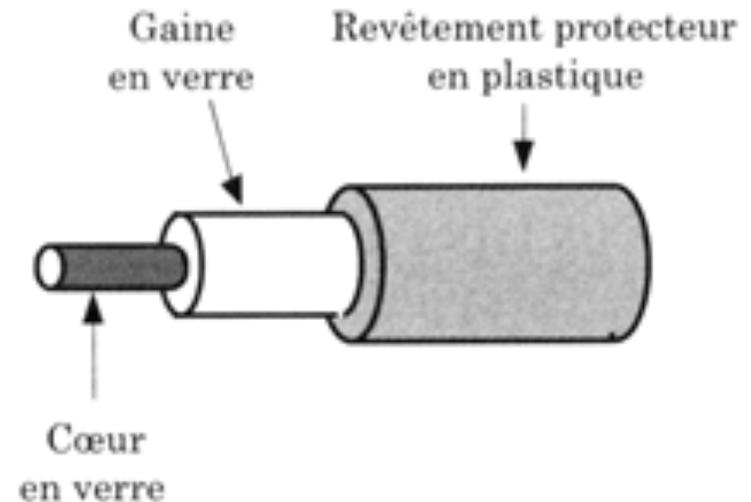
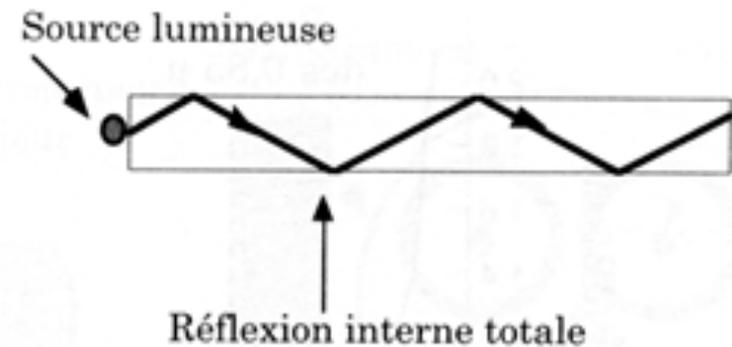
Câble coaxial

- Très bonne protection électromagnétique
- Utilisé principalement dans les réseaux de télédiffusion
 - Premiers réseaux LAN sur câble coaxiaux
- Largeur de bande: p.ex. 800 MHz sur plusieurs km



Fibre optique

- Basée sur le principe de la **réflexion totale** d'un faisceau lumineux à la frontière entre deux matériaux
- Une fibre optique consiste en
 - Un **cœur en verre (silice)**
 - Une **gaine, aussi en silice**, mais avec un indice de réfraction plus petit
 - Une **protection**



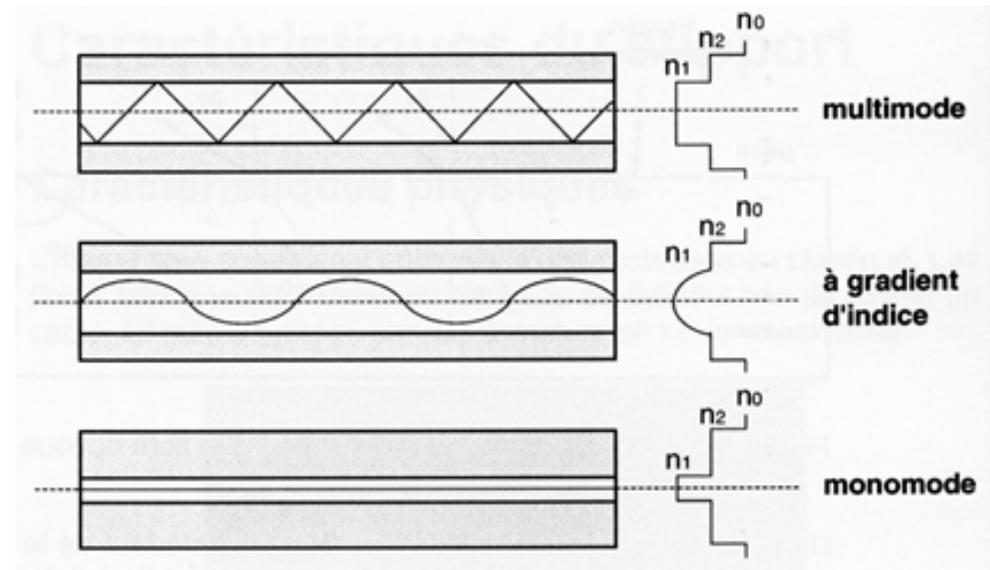
Types de fibres optiques

Fibre multimode

- Diamètre plus épais ($\sim 50 \mu\text{m}$)
- Le signal se propage avec plusieurs ‘angles’ (**modes**) différents
- L’interférence entre les modes limite la distance de transmission (**dispersion modale**)

Fibre monomode

- Diamètre plus petit ($\sim 10 \mu\text{m}$)
- Un seul mode est possible
- Très bonnes caractéristiques de transmission
- Plus chère



Sources lumineuses

LED

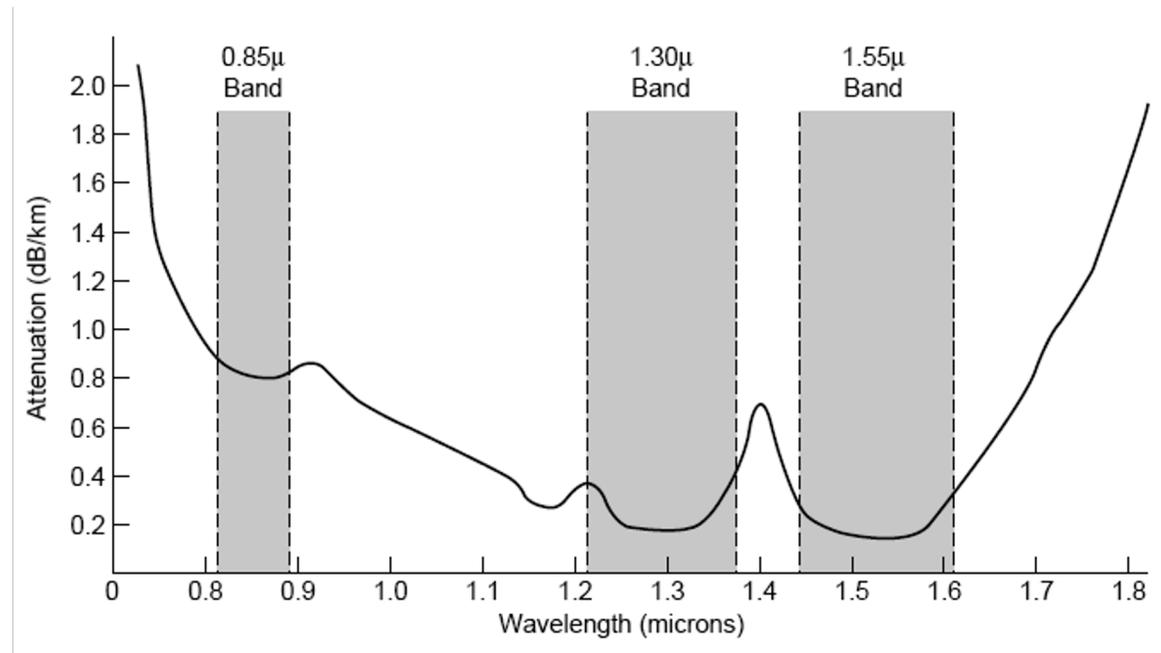
- Débit binaire faible
- Transmission multimode
- Bon marché
- Longue durée de vie

Diode Laser

- Débit binaire plus élevé
- Multimode ou monomode
- Plus cher
- Courte durée de vie

Fréquences de transmission

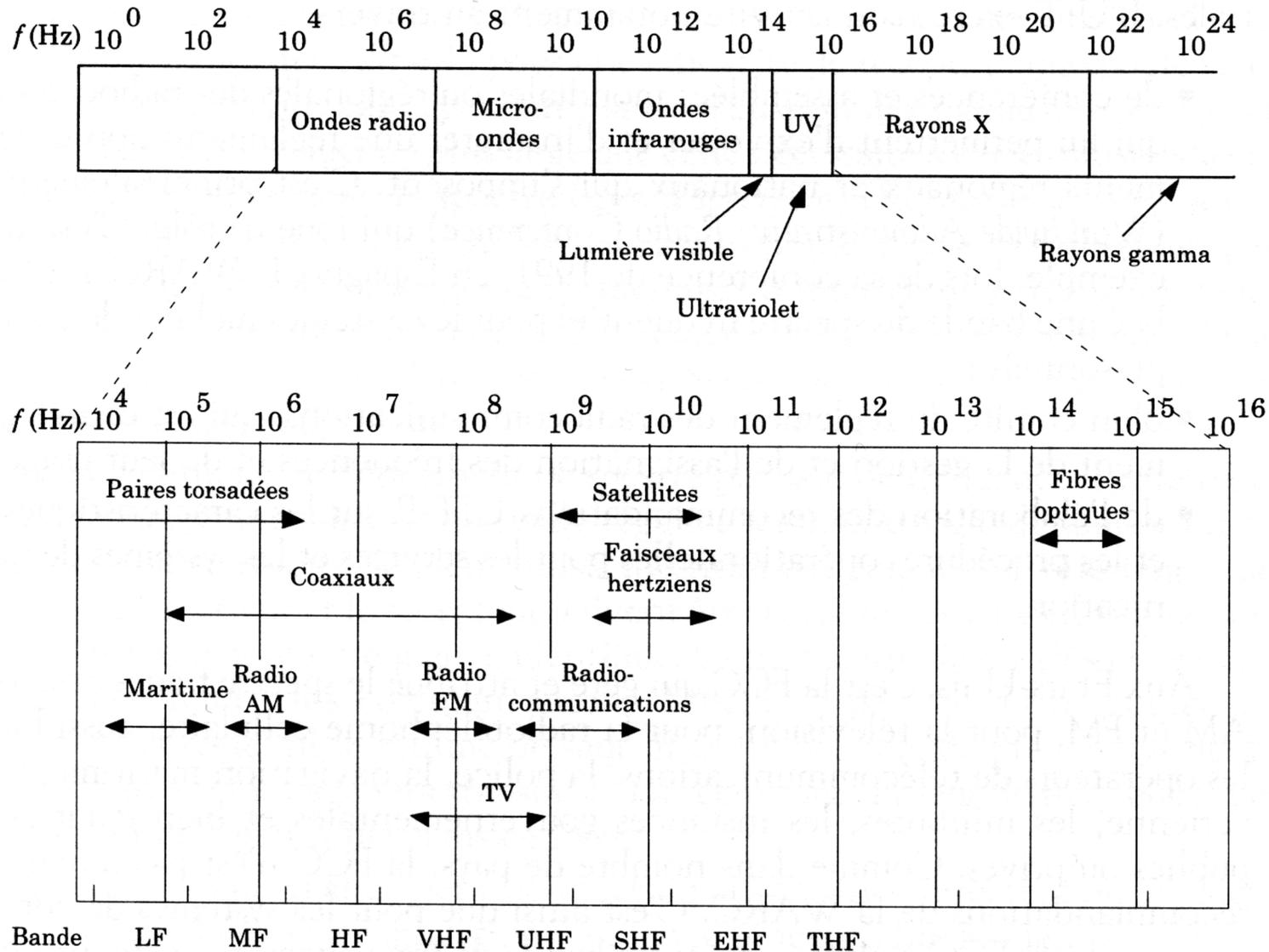
- Lumière infrarouge (~ 300 THz)
- Trois fenêtres optiques
- **Largeur de bande** > 10 THz



Transmission radio

- Utilisée depuis des décennies pour les réseaux WAN
 - Faisceaux hertziens et satellites
- **Nouvelles technologies sans fil**
 - Réseaux locaux sans fil (WLAN)
 - Réseaux mobiles (GSM, UMTS et LTE)
 - Réseaux MAN sans fil (WirelessMAN)
- La transmission radio est la base pour l'Internet ubiquitaire

Spectre électromagnétique



Caractéristiques des micro-ondes

- Utilisées pour la communication radio
- Fréquences: 250 MHz – 70 GHz
 - Propagation essentiellement en ligne droite
- Fréquences < 6 GHz
 - Traversent facilement les murs
- Fréquences > 6 GHz
 - Nécessitent une visibilité directe
- Fréquences > 12 GHz
 - Absorption par l'eau (brouillard, pluie)

Faisceau hertzien

- Transmission d'un faisceau très concentré de micro-ondes
 - Visibilité directe entre émetteur et récepteur
 - Antennes paraboliques directionnelles
 - Fréquences utilisées: 250 MHz à 22 GHz
 - Débit: typiquement 155 Mb/s ou 622 Mb/s
 - Distance: jusqu'à 200 km
 - Limitée par la courbure de la Terre
- Bon marché, mais de plus en plus remplacé par la fibre optique

Réseaux sans fils

WLAN ou WiFi (réseaux locaux sans fils)

- Débit: max 1,3 Gb/s (802.11ac)
- Distance: quelques 10 m (intérieur), quelques 100 m (extérieur)
- Fréquences: 2,4 GHz et 5 GHz

WiessMAN ou WiMAX (réseaux MAN sans fils)

- Depuis de 2005
- Débit: jusqu'à 100 Mb/s
- Distance: typiquement < 10 km, mais jusqu'à 70 km
- Fréquences: 2 GHz – 66 GHz (visibilité directe ou non)

Réseaux mobiles (LTE, UMTS, GSM)

- Débit: jusqu'à 2 Mb/s (UMTS), 300 Mb/s (LTE avec 4 antennes)
- Fréquences: < 2 GHz

Transmission par satellite

- Satellites GEO (*Geostationary Earth Orbit*)
 - A 36'000 km d'altitude, géostationnaires
 - Principalement pour la diffusion radio et TV
 - Peuvent être utilisés pour l'accès Internet
 - P.ex. 2 Mb/s voie descendante
 - Voie montante par ligne téléphonique ou antenne bidirectionnelle
- Satellites MEO (Medium Earth Orbit)
 - A env. 10'000 km d'altitude
 - Utilisés principalement pour le GPS
- Satellites LEO (Low Earth Orbit)
 - A env. 1'000 km d'altitude
 - Prévus pour l'accès Internet
 - Avantage: délai de propagation plus court que pour GEO
 - Inconvénient: jusqu'à 300 satellites sont nécessaires pour couvrir la Terre
 - Systèmes Iridium (Motorola), Globalstar (Broadcom), Teledesic (Bill Gates)

Concepts et unités

- Concepts de base :
 - La vitesse de transmission maximale pour un canal (Nyquist et Shannon)
- Unités
 - Watts, dB, dBm
 - bits/s, bauds

Les unités de puissance

- Watts (unité linéaire de puissance)
- dBm (unité logarithmique de puissance)
- dB (unité logarithmique des rapports entre puissances)

Watt

- Energie par unité de temps
- 1 Watt est égale à un Joule/s
- $1 \text{ mWatt} = 10^{-3} \text{ Watt}$

Le dB mWatt (dBm)

- Mesure de référence
- Exprime des valeurs logarithmiques par rapport à 1 mW
- Si P_r est donnée en unité linéaires (Watt),

$$P_r [dBm] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{1mW} \right)$$

Le dB (Décibel)

- Exprime le gain d'un dispositif actif ou les pertes d'un dispositif passif
- Rapport entre deux puissances P_1 et P_2 exprimé en forme logarithmique

$$\frac{P_1}{P_2} [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

- P_1 et P_2 dans l'argument du \log_{10} doivent être exprimées en unités linéaires

Exemple 1

- Exprimer 2 mW en dBm

$$10 \log_{10} \left(\frac{2 \text{ mWatt}}{1 \text{ mWatt}} \right) = 3 [\text{dBm}]$$

Exemple 2

- Exprimer 1 Watt en dBm

$$10 \log_{10} \left(\frac{1000 \text{ mWatt}}{1 \text{ mWatt}} \right) = 30 [\text{dBm}]$$

Exemple 3

- Exprimer -20 dBm en Watt

$$-20dBm = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1mWatt} \right)$$

$$\Rightarrow -2dBm = \log_{10} \left(\frac{P}{1mWatt} \right)$$

$$\Rightarrow 10^{-2} = 10^{\log_{10} \left(\frac{P}{1mWatt} \right)} = \frac{P}{1mWatt}$$

$$\Rightarrow P = 10^{-2} [mWatt]$$

Atténuation

- Tous les signaux s'affaiblissent au fur et à mesure qu'ils se propagent le long d'un médium de transmission
- Cet affaiblissement, appelé atténuation, est mesuré comme le rapport entre la puissance du signal transmis et celle du signal reçu.
- Il peut s'exprimer en unités linéaires (P_t/P_r) ou en dB.

$$\frac{P_t}{P_r} [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r} \right)$$

Atténuation

- Alors, si l'atténuation est appelée A ,

$$A = \frac{P_t}{P_r} \quad \text{Ce qui est équivalent à} \quad P_r = \frac{P_t}{A}$$

- En unités logarithmiques, cette équation devient :

$$P_r(dBm) = P_t(dBm) - A(dB)$$

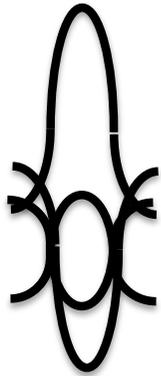
Exercice

- Vous transmettez 3 Watts et vous recevez à une certaine distance 1.5 Watts. Quelle est l'atténuation ? Exprimez le résultat en unités linéaires et logarithmiques

Bauds et bits par seconde



-
-
- **Bauds et bits par seconde**
On transmet des symboles et chaque symbole peut porter plusieurs bits.



00

- 
- Le nombre de symboles par seconde se mesure en bauds

Bauds et bits par seconde

- Si l'on transmet à 300 bauds et que chaque symbole porte 3 bits, alors la vitesse de transmission est de $300 \times 3 = 900$ bits/s
- Physiquement, ceci veut dire que nous utilisons un alphabet de 8 symboles différents

000 

001 

010 

011 

100 

101 

110 

111 

Bauds et bits par seconde

- La relation entre le nombre de symboles différents V (appelé aussi nombre de moments) et le nombre de bits par symbole n_b est $2^{n_b} = V$
donc $n_b = \log_2(V)$

Par exemple, si j'ai 4 moments: 1 V positif, 2 V positif 1 V négatif et 2 V négatif, alors le nombre de bits par symbole que je peux transmettre est

$$\log_2(4) = 2$$

Exercices

- Vous voulez transmettre à une vitesse de 100 kbit/s et 12,5 kbauds. Quel est le nombre de symboles différents dont vous avez besoin dans votre transmission ?

En une seconde, on transmet 100'000 bits.

En la même seconde, on transmet 12'500 symboles.

Ceci implique qu'il y a $100'000/12'500 = 8$ bits dans chaque symbole.

Donc,

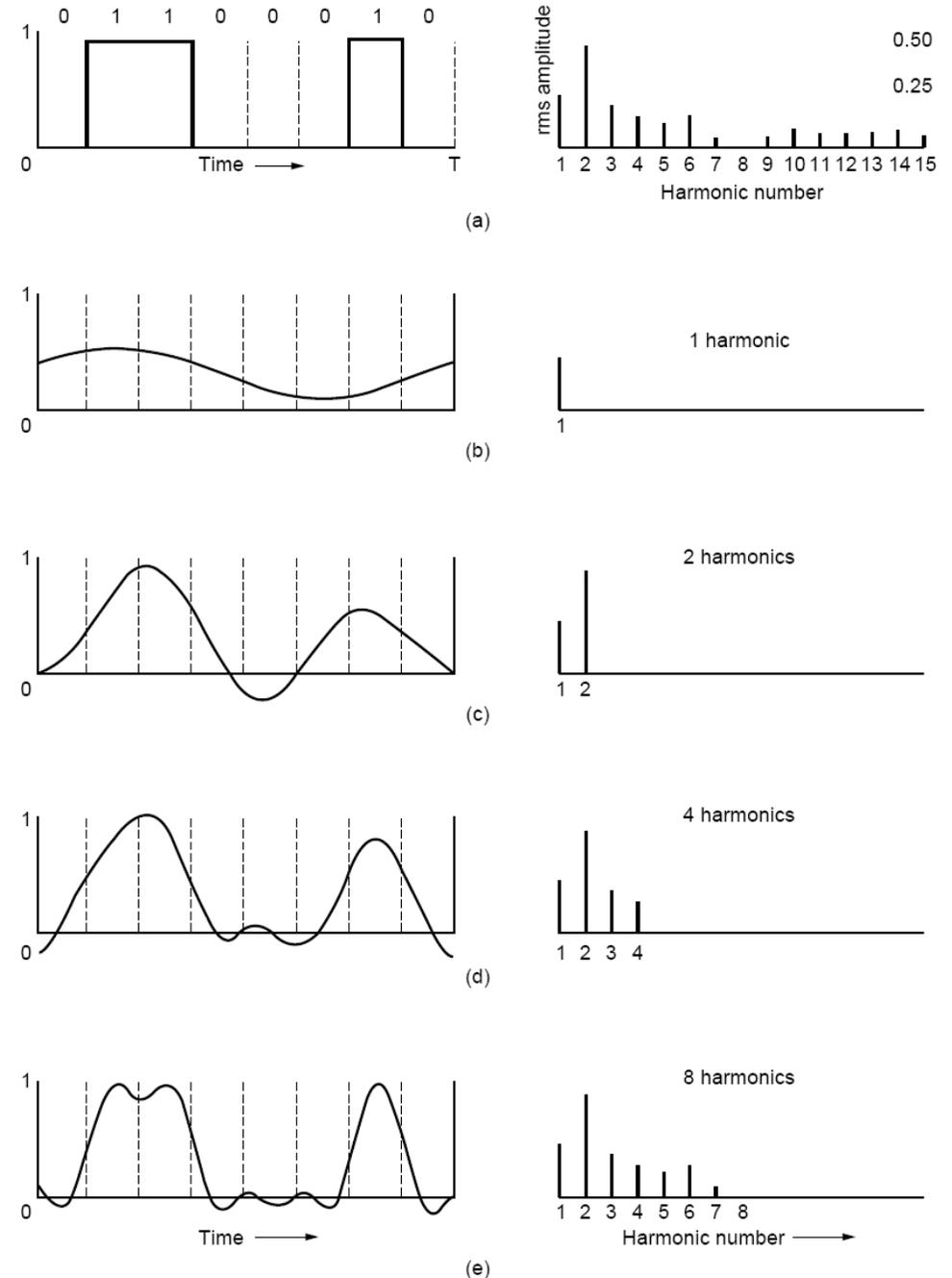
$$V = 2^{n_b} = 2^8 = 256 \text{ symboles différents}$$

Transmission de données numériques

- Les informations sont transmises en faisant varier certains paramètres physiques d'un signal
- Les caractéristiques de la transmission dépendent du **spectre** du signal
 - Affaiblissement
 - Interférences entre plusieurs transmissions
- Le spectre peut être évalué à l'aide de **l'analyse de Fourier**

Exemple d'un signal

- Transmission d'une séquence binaire 01100010
- Le spectre du signal consiste
 - en une fréquence fondamentale
 - plus les harmoniques
- Le média de transmission **affaiblit** le signal de manière **non-uniforme** en fonction de la fréquence des composantes
- **Distorsion du signal:** le signal reçu par le récepteur est déformé

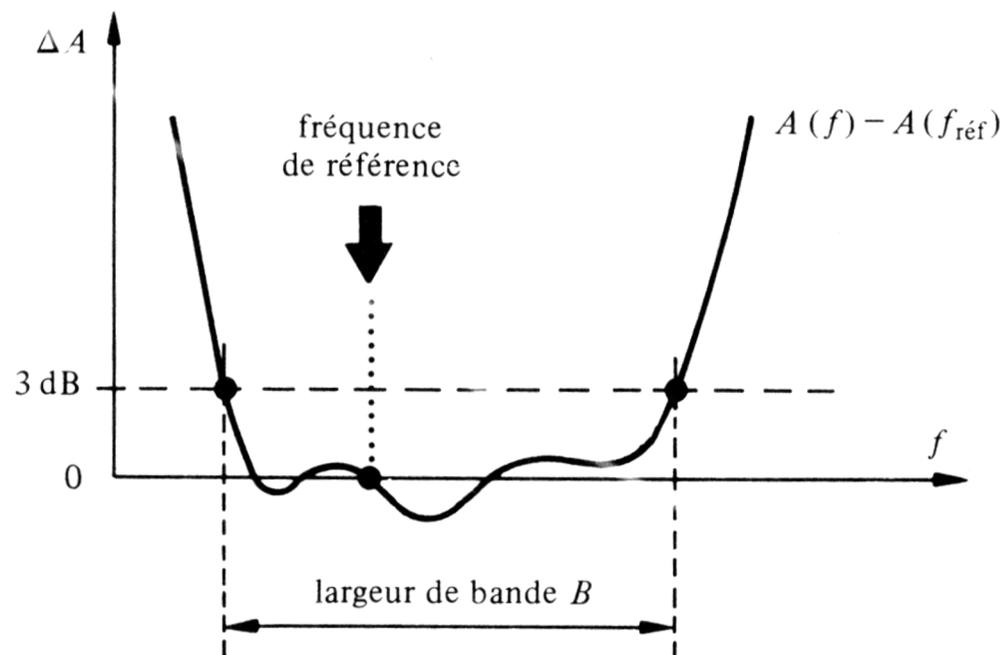


Largeur de bande

- L'affaiblissement non-uniforme du spectre limite la plage des fréquences utilisables pour la transmission
- La **largeur de bande** d'un canal est la plage de fréquences dans laquelle les distorsions du signal sont encore tolérables

Exemple:

- Affaiblissement tolérable: ± 3 dB par rapport à la fréquence de référence
- Largeur de bande B du canal



Deux théorèmes aident à déterminer la vitesse maximale de transmission

- Le théorème de Nyquist (nombre maximal de symboles pas seconde sans bruit)
- Le théorème de Shannon pour calculer la capacité d'un canal (nombre maximum de bits par seconde avec bruit)

Théorème de Nyquist

- Le débit binaire maximum D_{\max} en bits/s d'un canal **exempt de bruit** dépend
 - de la **largeur de bande B** du canal
 - du **nombre de moments V** :

$$D_{\max} = 2 \cdot B \cdot \log_2 V$$

Capacité de Shannon

- Vitesse maximale de transmission dans un canal

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

- S est le signal côté récepteur
- N (de Noise en anglais) est le bruit côté récepteur.
- S et N doivent être exprimés en **unités linéaires**
- B est la largeur de bande du canal (Hz, MHz, etc.)
- C est la capacité du canal en bits/s ou Mbits/s ou unités équivalentes

Exemple

Soit un canal (paire torsadée, comme ADSL) ayant

- un rapport signal/bruit de 30 dB : $S/N = 10^3$
- une largeur de bande : $B = 1 \text{ MHz}$

Capacité du canal :

$$C = 10^6 \times \log_2 (1 + 10^3) = 10 \text{ Mb/s}$$

Débit réel (ADSL) : 9 bits/Hz sur 3 km sont réalisables

Transmission en bande de base

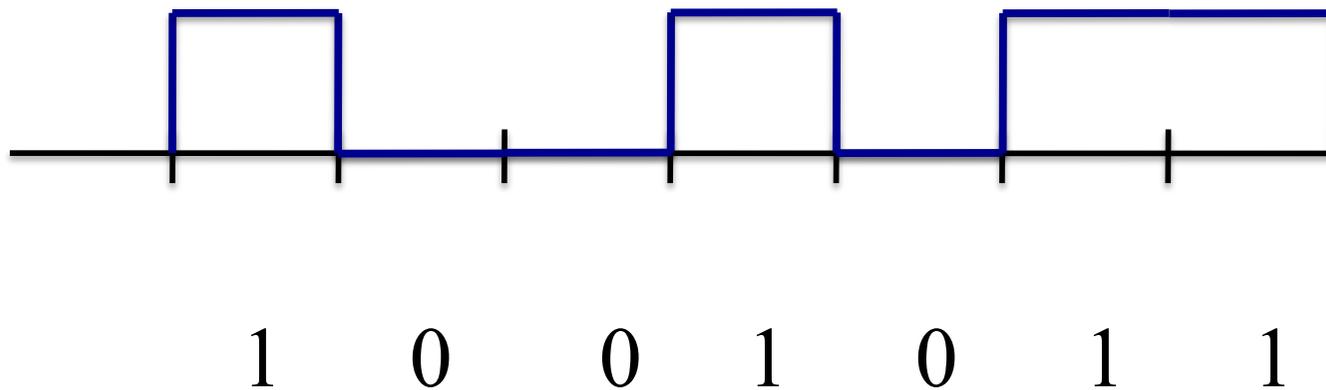
- Méthode de transmission la plus simple
 - Transmission de différents niveaux de courant pour coder les bits 0 et 1
- Critères qui déterminent le choix du code
 - Absence d'une composante continue lors de la transmission d'une séquence binaire
 - Concentration de la puissance du signal dans une bande de fréquence limitée
 - Bonne teneur en horloge pour faciliter la synchronisation du récepteur

Codage de ligne

- NRZ, NRZ-M, NRZ-S unipolaire et antipolaire
- RZ, RZ-M, RZ-S unipolaire et antipolaire
- AMI
- Biphassé, Biphassé-M, Biphassé-S

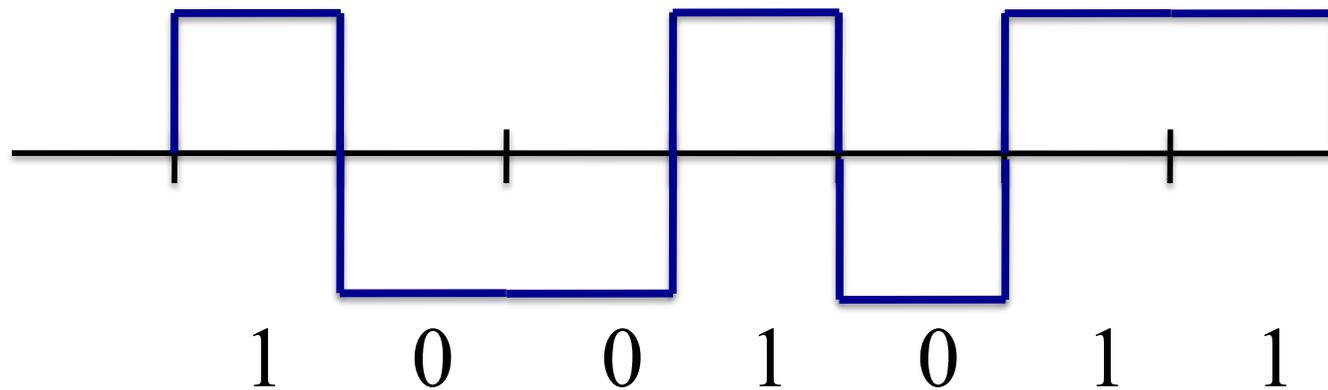
Codage de ligne

- NRZ unipolaire



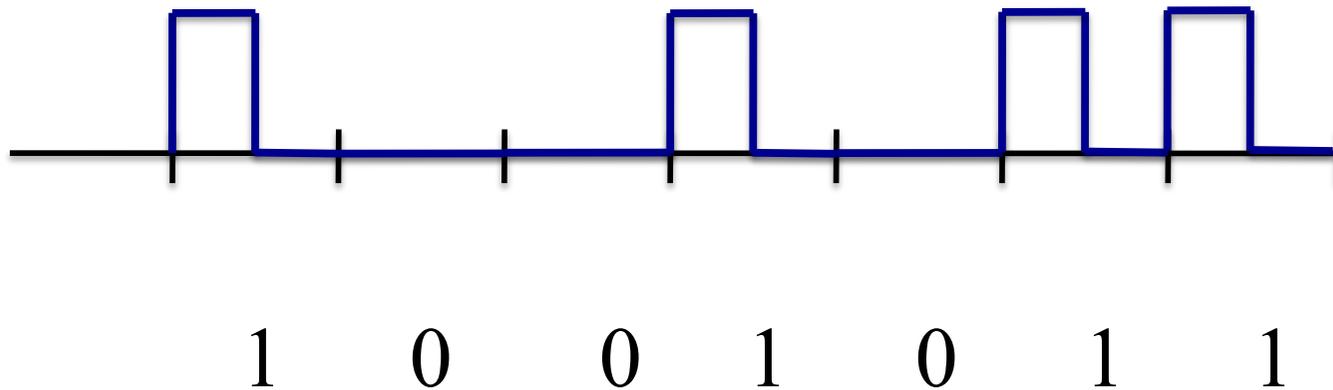
Codage de ligne

- NRZ antipolaire



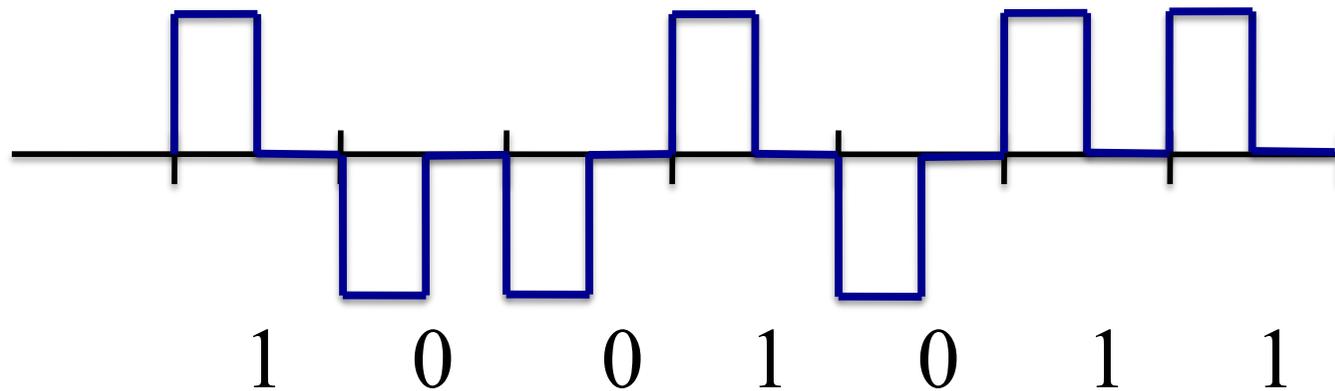
Codage de ligne

- RZ unipolaire



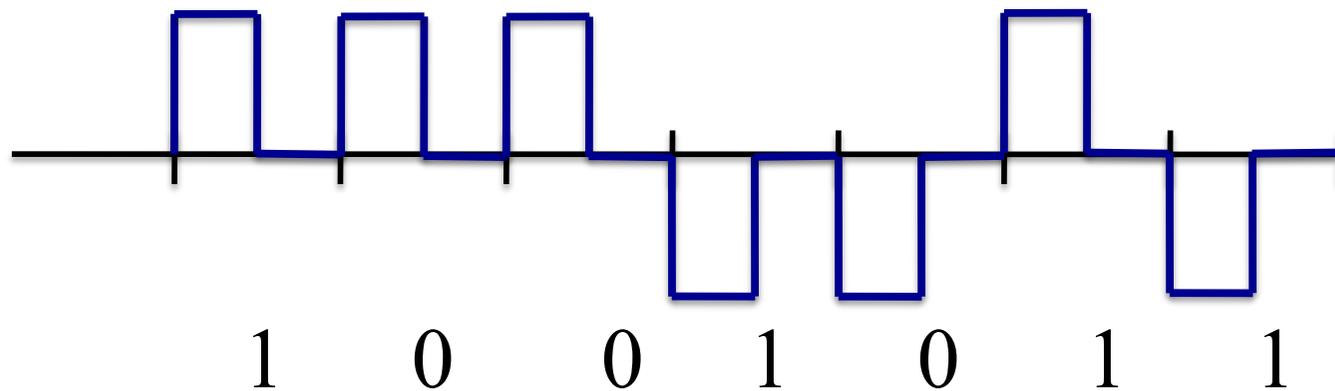
Codage de ligne

- RZ antipolaire



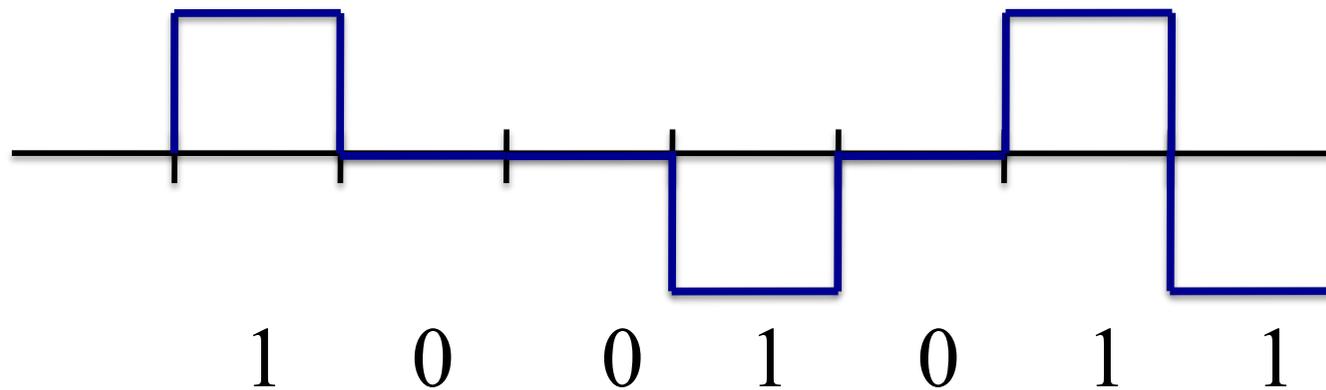
Codage de ligne

- RZ-M antipolaire



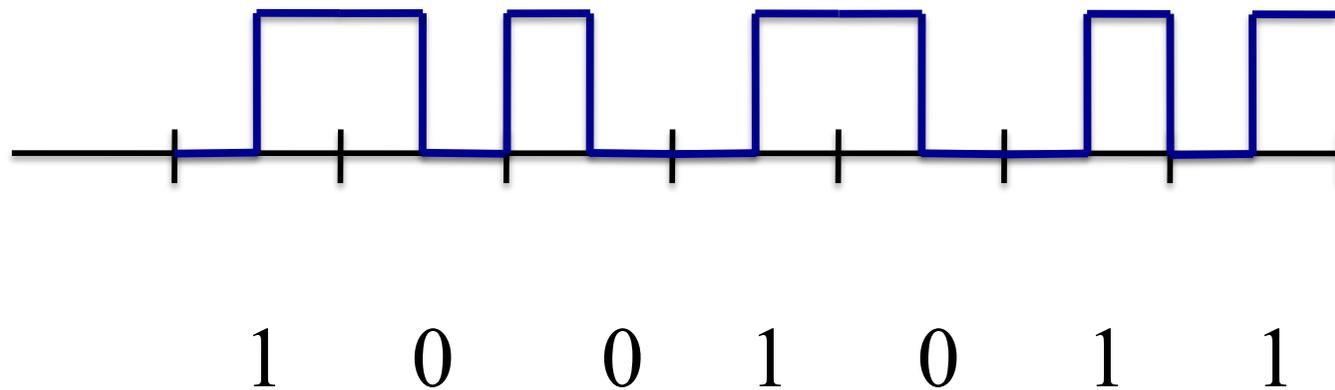
Codage de ligne

- AMI



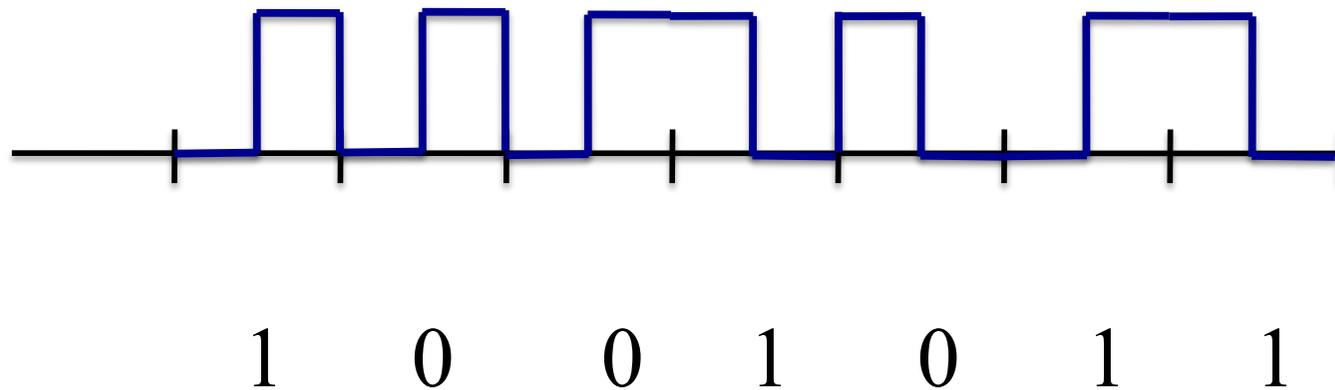
Codage de ligne

- Manchester (Biphasé)



Codage de ligne

- Biphase-M



Exercice

- Coder la série suivante de bits utilisant le codage de ligne AMI

1 1 1 0 1 0 0

Exercice

- Coder la série suivante de bits utilisant le codage de ligne NRZ antipolaire

1 1 1 0 1 0 0

Exercice

- Coder la série suivante de bits utilisant le codage de ligne Manchester-M

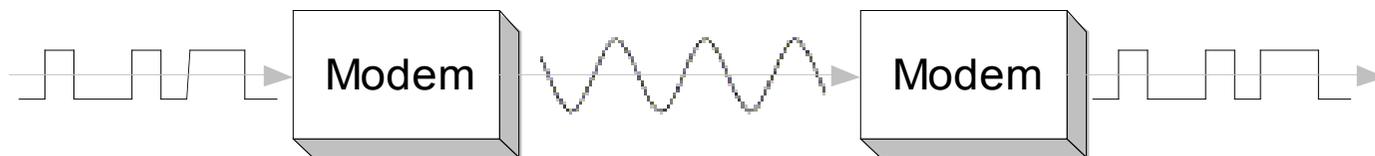
1 1 1 0 1 0 0

Modulation

- La transmission en bande de base n'est utilisable qu'à de courtes distances ($< 5\text{km}$)
 - Les distorsions déforment le signal

Modulation

- Transpose le signal à transmettre dans la bande passante du canal
- Utilise un signal sinusoïdal avec une fréquence adaptée au canal comme porteuse
- **Modem** (Modulateur-Démodulateur): prend en entrée un signal en bande de base pour en faire un signal sinusoïdal, et inversement.



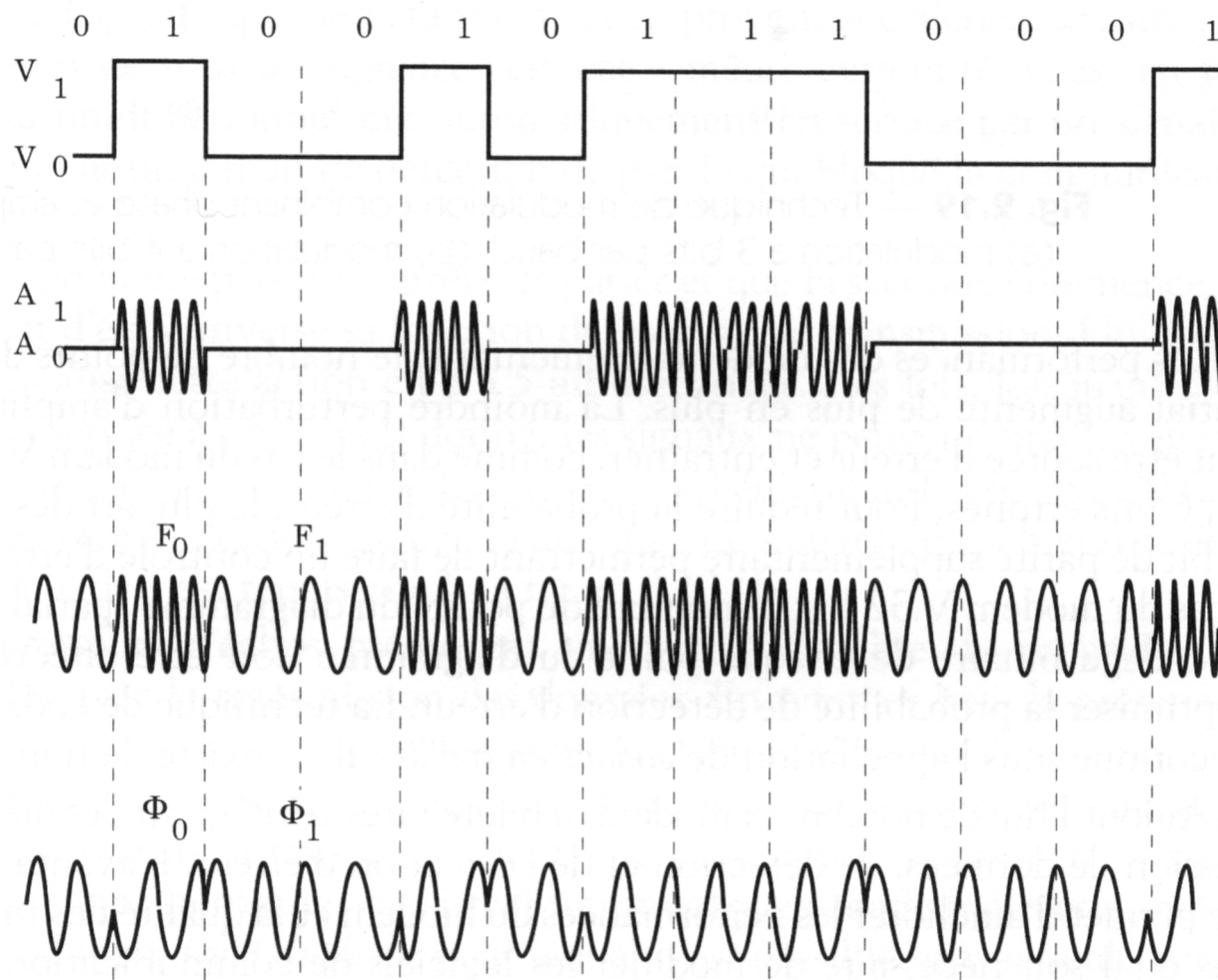
Types de modulation

- Le signal modulé est décrit par la fonction

$$p(t) = A_p \cos(\omega_p t + \theta_p)$$

- Trois types principaux de modulation, selon le paramètre varié

- ASK
- FSK
- PSK



Modulation QAM

- Pour un débit binaire élevé, on peut **augmenter le nombre de ‘symboles’** par action de modulation (augmentation du nombre de moments)
- Les techniques de modulation plus performantes combinent plusieurs modulations élémentaires

Modulation QAM

(Quadrature Amplitude Modulation)

- Fait varier la phase et l’amplitude du signal pour coder les différents symboles

