

## Partie 2

### Circuit de données

# Circuit de données - Plan

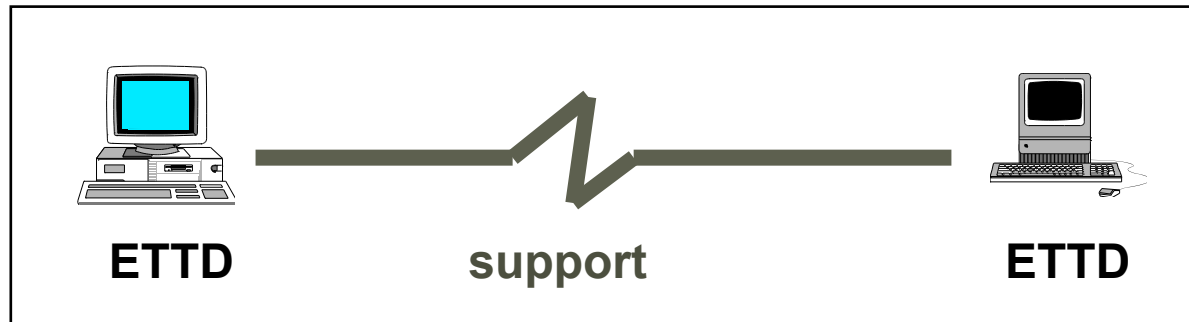
1. Support de transmission
2. Éléments de traitement du signal
3. Numérisation
4. Modes de transmission du signal
5. Circuit de données

# Problématique



ETTD : Equipement Terminal de Traitement de Données  
[Terminal ou machine terminale ou équipement terminal]

# Un support de transmission



## ▣ Les différents types

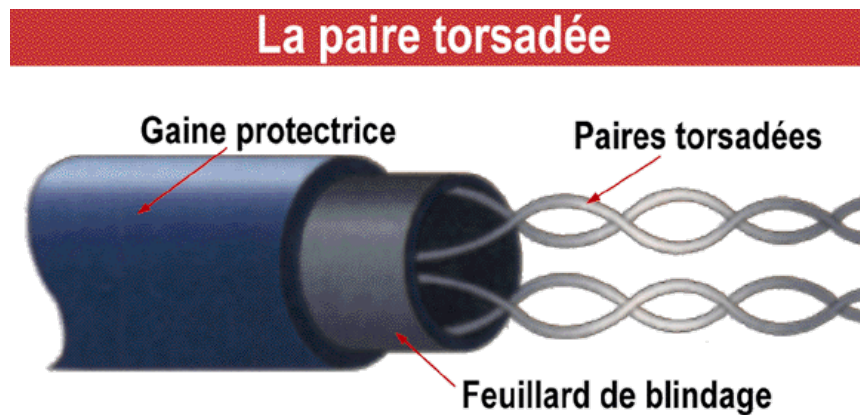
- ▣ les supports métalliques
- ▣ les supports optiques
- ▣ les supports radio

## ▣ Les critères de comparaison

- ▣ bande passante
- ▣ atténuation
- ▣ sensibilités diverses
- ▣ coût et facilité d'installation

# Les paires torsadées

- À quoi ça ressemble ?



# Les paires torsadées

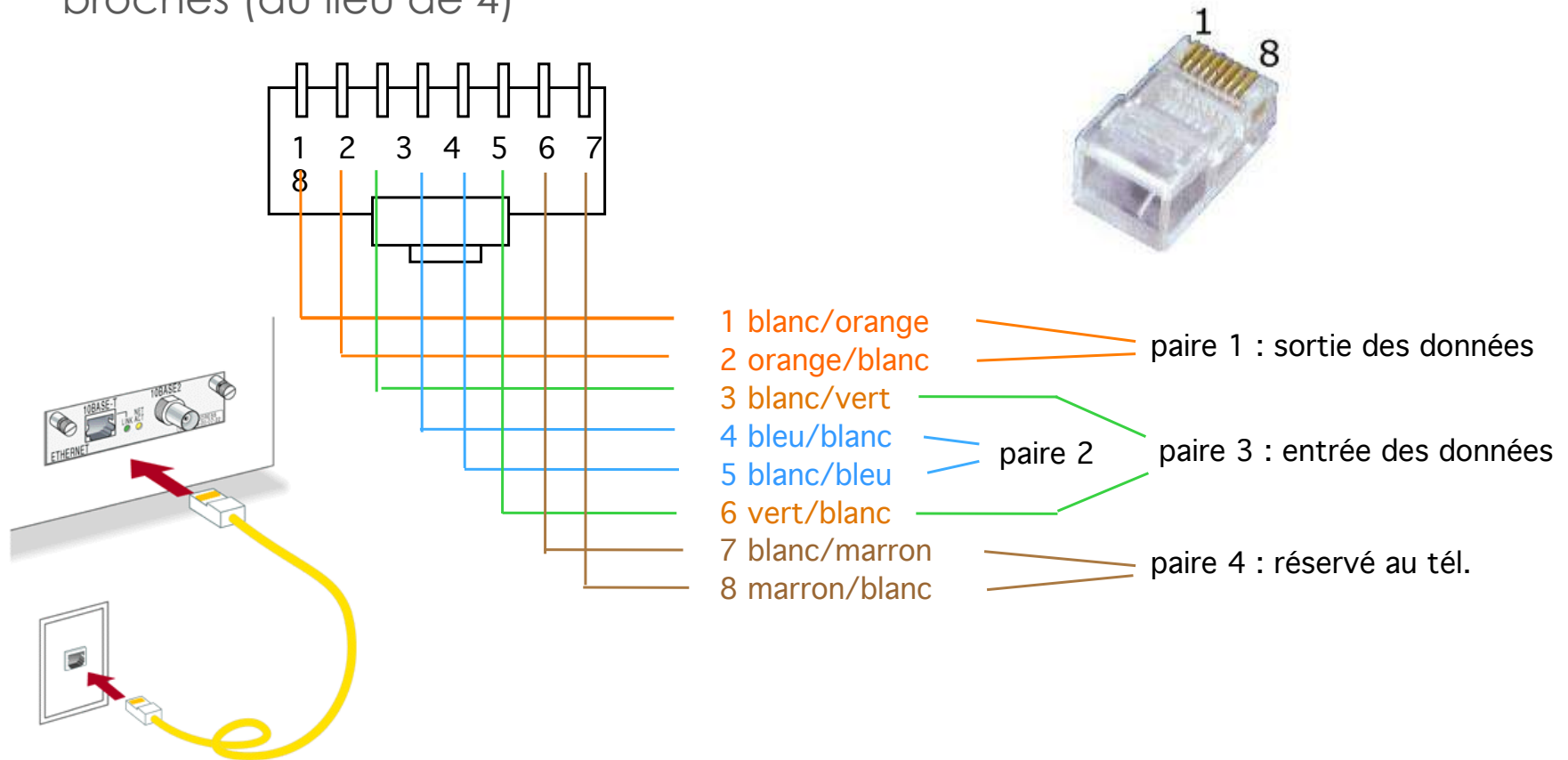
- qu'est-ce c'est ?
  - deux brins de cuivre, de diamètre inférieur au millimètre, isolés et agencés en spirale
  - une paire = un lien de communication
  - 2, 4 ou 8 paires dans une même gaine = un câble
  - transmission analogique (téléphone) ou numérique (LAN)
  - bande passante de quelques centaines de kHz
    - 30 kbit/s en analogique (5-6 km)
    - 100 Mbit/s en numérique (100 m)
  - paires non blindées (UTP) / blindées (STP)

# Les paires torsadées

- classification EIA/TIA-568
  - UTP 1 : câble téléphonique traditionnel (transfert de voix mais pas de données)
  - UTP 2 : transmission des données à 4Mbit/s maximum (RNIS). Il est composé de 4 paires torsadées
  - UTP 3 (voice grade)
    - 10 Mbit/s maximum
    - souvent groupées par 4 dans une gaine plastifiée
  - UTP 4
    - 16 Mbit/s maximum
    - 4 paires
  - UTP 5 (data grade).
    - 100 Mbit/s maximum
    - enroulement plus serré et du Teflon pour l'isolation → moins de diaphonie, une meilleure qualité de signal sur de longues distances
  - UTP 6, 250Mhz, performance double de 5e
  - UTP 6a, 500Mhz, performance double Cat6, utilisation 10GigE
  - UPT 7, ISO/IEC, 4 STP, 600Mhz

# Les paires torsadées

- la connectique : la prise RJ45
  - similaire à la prise RJ11 du téléphone, en plus grande et avec 8 broches (au lieu de 4)





# Les paires torsadées

## ■ Les plus

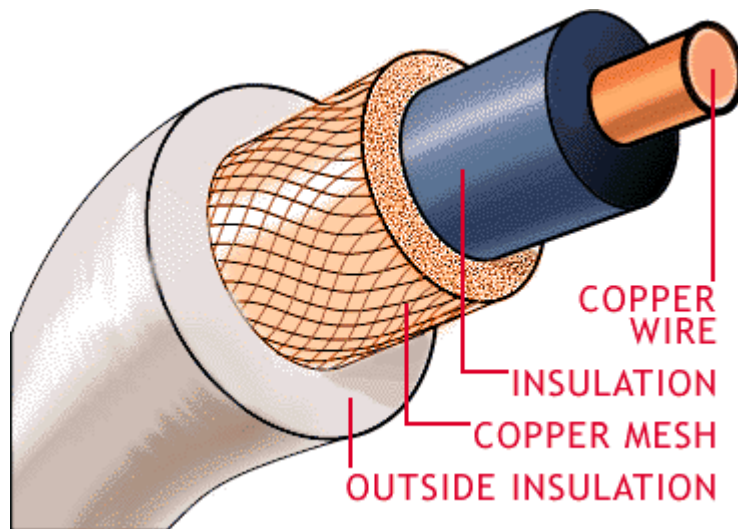
- simple
- économique
- réutilisation de l'existant

## ■ Les moins

- sensibilité aux perturbations électromagnétiques
- atténuation très importante du signal

# Le câble coaxial

■ À quoi ça ressemble ?

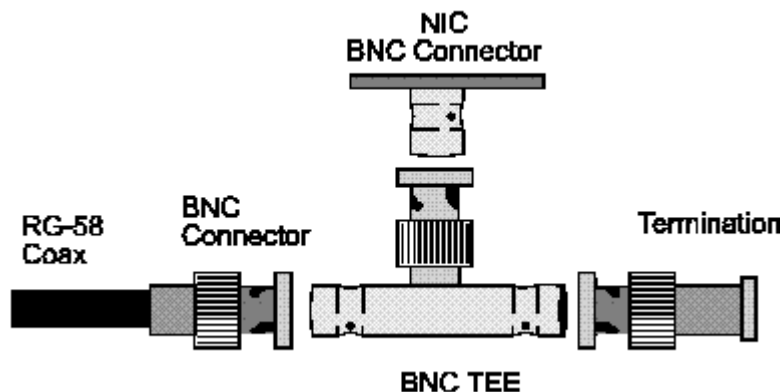


# Le câble coaxial

- qu'est-ce c'est ?
  - 2 conducteurs cylindriques de même axe séparés par un isolant diélectrique, le tout étant protégé par une gaine plastique
  - 2 types de câble en fonction de l'impédance
    - le câble 75  $\Omega$ , dit "large bande" (broadband)
      - transmission analogique : c'était le câble de télévision analogique
    - le câble 50  $\Omega$ , dit "bande de base" (baseband)
      - BP de quelques centaines de MHz → débits élevés
        - des centaines de Mbit/s, voire 1 à 2 Gbit/s sur 1 km en point-à-point
        - 10 Mbit/s en multipoint
  - 2 diamètres
    - "thick" (2,6/9,5) : le connecteur est la prise vampire
    - "thin" (1,2/4,4) : le connecteur est la prise en T

# Le câble coaxial

- La connectique "thick" (diamètres de 2,6/9,5) :
  - connecteur : la prise vampire (le câble est percé avec le connecteur de manière à réaliser directement la connexion physique et électrique). Premier câblage d'Ethernet.
- La connectique "thin" (diamètres de 1,2/4,4) :
  - connecteur : la prise en T (appelée ainsi car elle ressemble à la lettre "T") (l'une des branches permettant de relier la station, les deux autres étant connectées au deux segments de câble) ; Permet de réaliser un câblage « volant » (Ethernet fin).



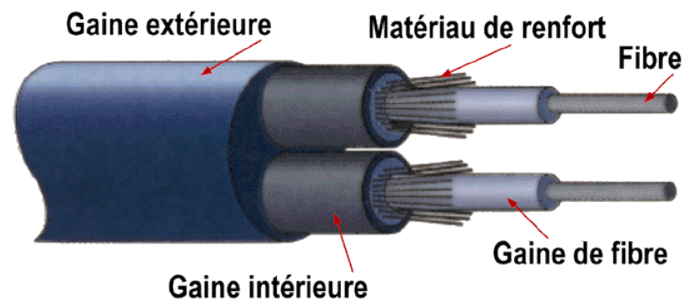
# Le câble coaxial

- Les plus
  - meilleure qualité de transmission
  - débits plus importants
  - facilité de manipulation discutable (poids, flexibilité)
- Les moins
  - coût plus élevé
- A été longtemps un câblage de prédilection, remplacé aujourd'hui par de la fibre

# La fibre optique

■ À quoi ça ressemble ?

## La fibre optique

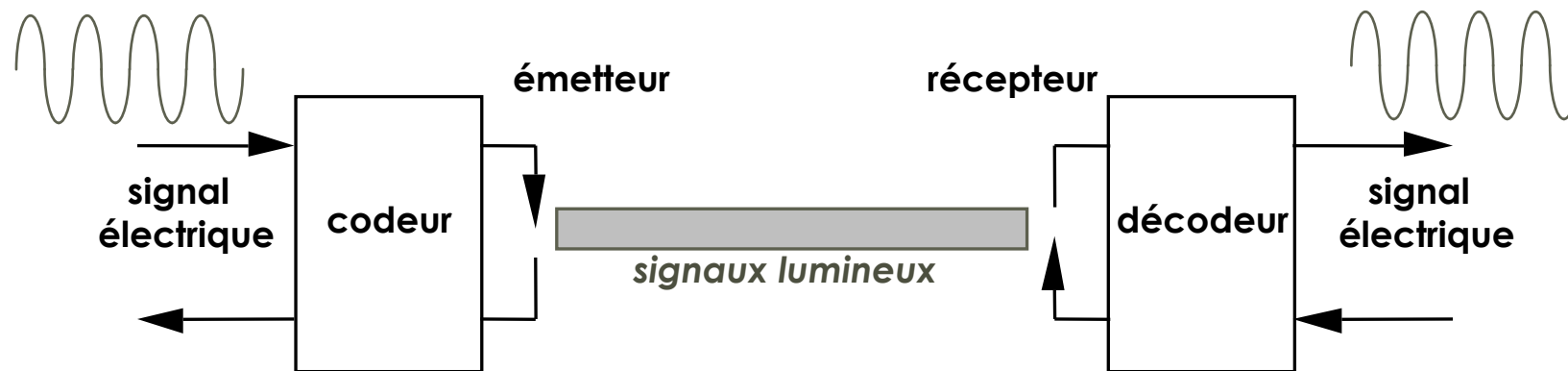


# La fibre optique

- qu'est-ce que c'est ?
  - cylindre de verre ou de plastique, extrêmement fin (diamètre  $\sim \mu\text{m}$ ), recouvert d'un isolant
  - un câble = plusieurs fibres réunies au sein d'une même gaine protectrice pour former un câble
  - conduit un rayon optique modulé : joue le rôle d'un guide d'ondes lumineuses
    - pour des longueurs d'ondes 850 nm, 1300 nm, 1500 nm
    - dans la gamme des infrarouges :  $10^{14}$  à  $10^{15}$  Hz
  - transmission analogique seulement
  - BP de quelques 10 MHz à 100 GHz
    - 600 Mbit/s,
    - 2 Gbit/s, 10, 50 Gbit/s

# La fibre optique

- Une connexion nécessite :
  - Un émetteur optique : diode électroluminescente(LED), diode laser ou laser modulé
  - Un récepteur optique : photodiode



- Les différents types :
  - fibre multimode à saut d'indices : 100 Mbit/s
  - fibre multimode à gradient d'indices : 1 Gbit/s
  - fibre monomode : 100 Gbit/s



# La fibre optique

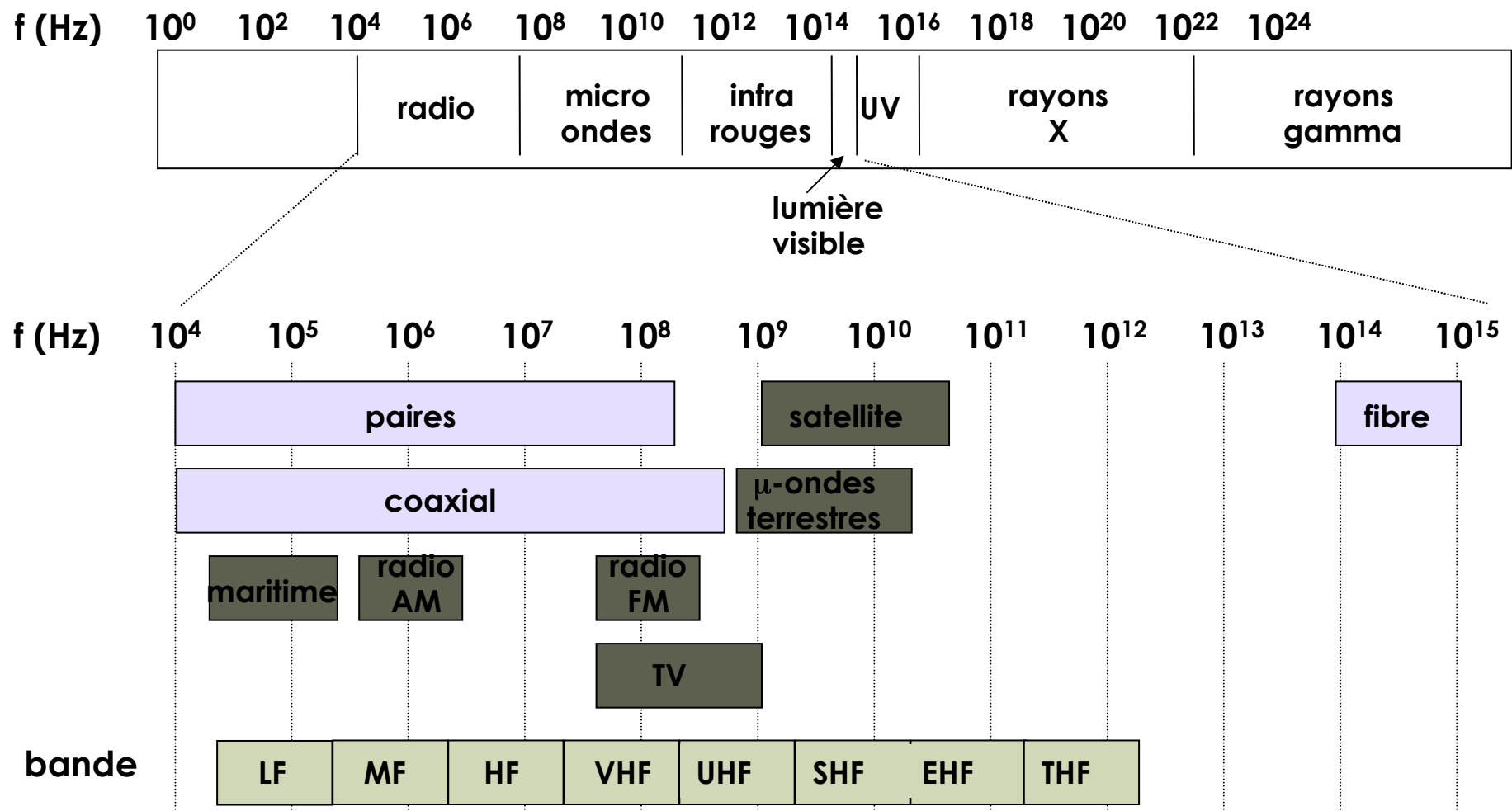
## ■ Les plus

- bande passante immense → débits très importants
- atténuation plus faible
- insensibilité aux interférences électromagnétiques
- insensibilité aux corrosions chimiques de l'air
- faible poids, faible encombrement

## ■ Les moins

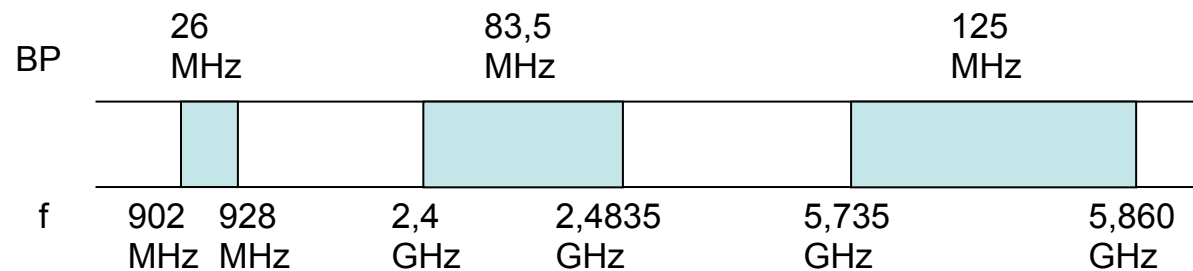
- fragilité
- transmission unidirectionnelle
- câblage délicat
- coût élevé des interfaces

# Le spectre électromagnétique et son utilisation



# La bande ISM

- Industrial, Scientific, Medical
  - fours micro-ondes, systèmes d'ouverture des portes de garages, souris d'ordinateurs, téléphones cordless, jouets télécommandés, ...
- principe
  - n'importe qui peut émettre à volonté, mais la puissance d'émission est limitée
  - la position des bandes varie d'un pays à l'autre
    - ex : US, puissance limitée à 1 Watt



- ex : en France, l'ANFR (Agence Nationale des Fréquences) publie le TNRBF (Tableau National de Répartition des Bandes de Fréquences)

# Circuit de données - Plan

1. Support de transmission
2. Éléments de traitement du signal
3. Numérisation
4. Modes de transmission du signal
5. Circuit de données

# Caractérisation du signal et du support

La transmission de données se fait par la transmission d'un signal, qui représente des données, sur le support physique

- le support est caractérisé (fréquentiellement) par sa bande passante
- quid du signal ?
  - $x(t)$  : caractérisation temporelle
  - et en fonction des fréquences ???

↪ Transformées et Séries de Fourier

# Décomposition en série de Fourier

- Toute fonction périodique  $g(t)$  de période  $T$  peut se décomposer en une somme (éventuellement infinie) de fonctions sinus et cosinus

$$g(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi n f_0 t)$$

$f_0$  : la fréquence fondamentale ( $f_0 = \frac{1}{T}$ )

$a_n$  et  $b_n$  : les amplitudes cosinus et sinus de la  $n^{\text{ième}}$  harmonique

$c_0$  : la composante continue du signal

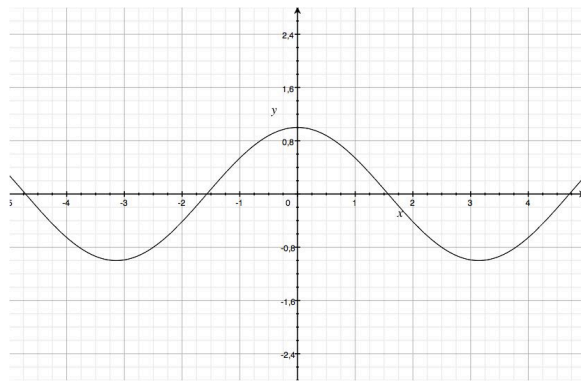
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt$$

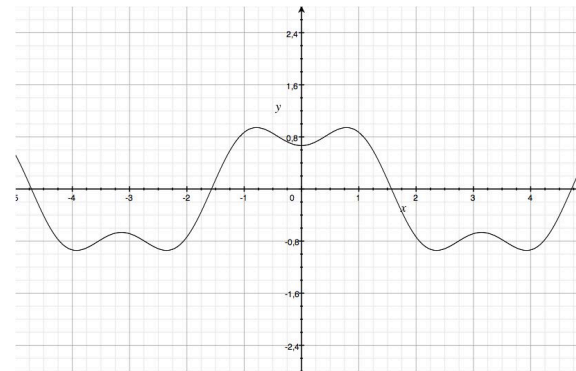
$$c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt$$

# Décomposition en série de Fourier

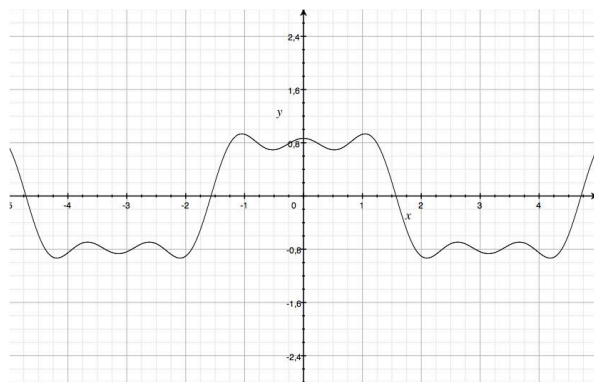
- Exemple de décomposition d'une fonction créneau en série de Fourier



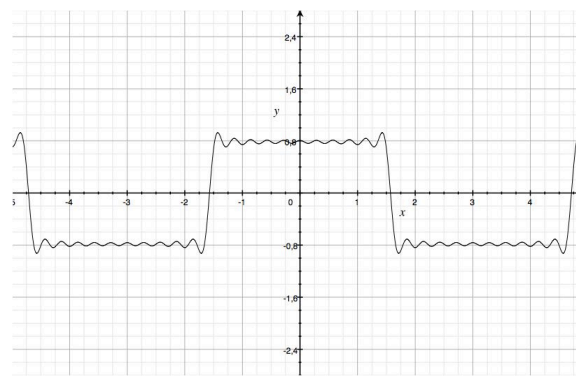
$$y = \cos(x)$$



$$y = \cos(x) - \frac{1}{3} \cos(3x)$$



$$y = \cos(x) - \frac{1}{3} \cos(3x) + \frac{1}{5} \cos(5x)$$



$$y = \cos(x) - \frac{1}{3} \cos(3x) + \frac{1}{5} \cos(5x) - \frac{1}{7} \cos(7x) + \dots + \frac{1}{21} \cos(21x)$$

# Décomposition en série de Fourier

- La décomposition en série de Fourier peut être également écrite sous la forme complexe

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{j2\pi n f_0 t} \quad \text{avec} \quad c_n = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) e^{-j2\pi n f_0 t} dt$$

- La forme complexe peut être obtenue à partir de la forme algébrique en posant

$$c_n = \frac{a_n - j b_n}{2}$$

et en utilisant les formules d'Euler

$$\cos(\theta) = \frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2} \quad \text{et} \quad \sin(\theta) = \frac{e^{j\theta} - e^{-j\theta}}{2j}$$

$j$  est le nombre complexe tel que  $j^2 = -1$  et  $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$



# Caractérisation du signal de données

Le spectre de puissance d'un signal

- définit la répartition de la puissance du signal en fonction de la fréquence
- est déterminé par décomposition en
  - une transformée de Fourier pour un signal non périodique
  - une série de Fourier pour un signal périodique

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} C_k \cdot e^{2\pi i f_k t}$$

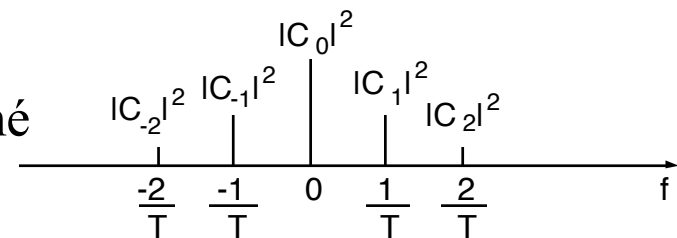
coefficient de Fourier  $C_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-2\pi i f_k t} dt$

$$f_k = \frac{k}{T} \quad \begin{cases} k = 0 & f_0 \text{ fréquence fondamentale} \\ k \neq 0 & f_k \text{ fréquence harmonique} \end{cases}$$

- La puissance  $P$  de  $x(t)$  est répartie sur l'axe des fréquences aux points  $f_k$

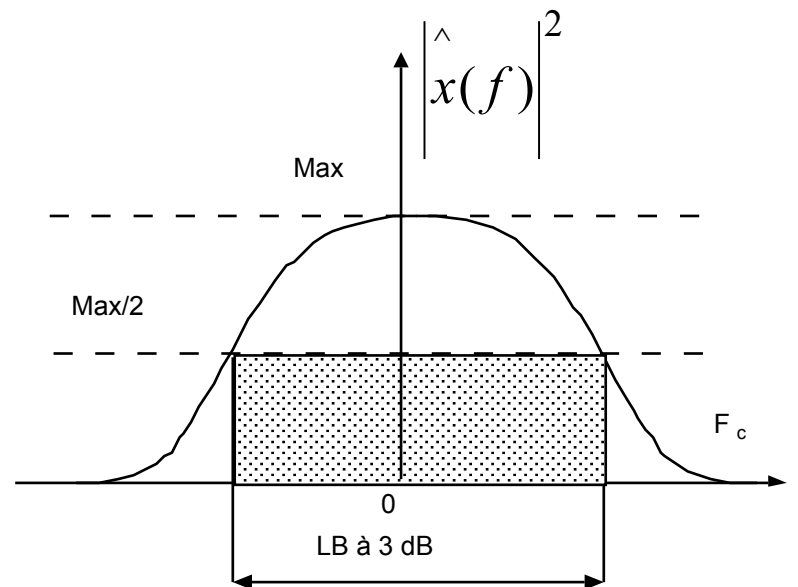
suivant les valeurs de  $|C_k|^2$ :  $P = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} |C_k|^2$

- Le spectre de puissance de  $x(t)$  est donné par l'ensemble des  $|C_k|^2$

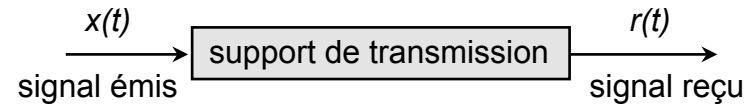


# Caractérisation du signal de données

- le support spectral du signal est la plage des fréquences qu'il utilise
- notion de support spectral à  $n$  dB
- la largeur spectrale (ou largeur de bande) est la largeur de ce support



# Modélisation du support



- cas idéal :  $x(t) = r(t)$

- mais :

- atténuation du signal

- perte d'énergie que subit le signal lorsqu'il se propage ; l'amplitude de  $r(t)$  est inférieure à celle de  $x(t)$
    - le signal décroît de façon logarithmique lorsque la distance augmente → l'atténuation est mesurée en dB/km
    - toutes les fréquences contenues dans le signal ne sont pas atténuées de la même façon
    - généralement connue pour un support donné → utilisation d'amplificateurs
    - le support agit comme un filtre : il ne laisse pas passer toutes les fréquences !

# Modélisation du support

- distorsion de phase
  - les fréquences contenues dans le signal ne voyagent pas à la même vitesse
- bruits
  - lors de sa propagation sur une ligne, le signal est perturbé par des signaux parasites ; il s'agit d'énergie non voulue en provenance de sources autres que l'émetteur
    - bruit blanc : bruit d'agitation thermique permanent dont la puissance est uniformément répartie dans la bande de fréquences utilisée
    - bruit impulsif : bruit se présentant sous forme de tensions perturbatrices de valeur élevée mais de durée brève
  - mesurés par un rapport signal/bruit
  - le support génère des erreurs de transmission !

# Notion de bande passante

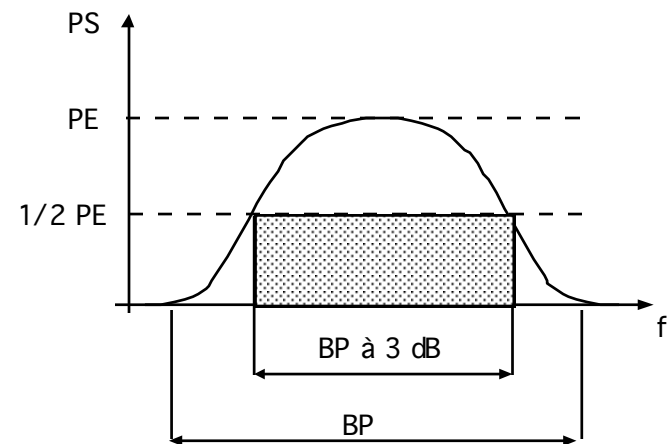
## Bande Passante

La bande passante est définie comme l'intervalle  $[f_1, f_2]$  de fréquence dans laquelle l'amplitude de la réponse d'un système ne s'écarte pas d'un niveau défini.

**Bande passante à  $n$  dB :**  $[f_1, f_2]$  tel que  $10 \log_{10} \frac{P_E}{P_S} \leq n$

exemple : BP à 3 dB

La puissance du signal en sortie est au pire égale à la moitié de la puissance du signal en entrée



# Adaptation du signal

- le support est caractérisé (fréquentiellement) par sa BP
  - le signal est caractérisé par son spectre
- ☹ le plus souvent, le support spectral du signal n'est pas inclus dans la BP du support !!!
- ↳ nécessité d'adapter le signal au support

# Capacité théorique d'un canal bruité

## □ Loi de Shannon

- elle fournit le débit binaire maximum auquel on peut théoriquement transmettre sans erreur sur un canal à bande passante limitée et sujet à des bruits

□  $C = B \cdot \log_2 (1 + PS/PN)$  

- C est la capacité maximum théorique du support
- B est la largeur de la bande passante (en Hz)
- PS/PN est le rapport des puissances signal à bruit (sans unité)
- $S/N = 10 \cdot \log_{10} (PS/PN)$
- S/N en dB

# Circuit de données - Plan

1. Support de transmission
2. Éléments de traitement du signal
3. Numérisation
4. Modes de transmission du signal
5. Circuit de données



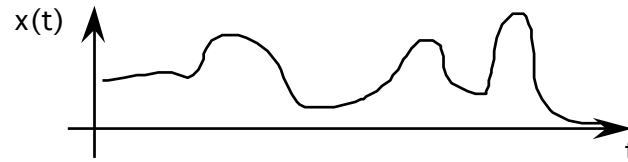
# Message numérique vs. analogique

- **message** = données que l'utilisateur souhaite transmettre

- message **analogique**

- espace de temps continu, espace de valeurs continu

- ex : voix, vidéo, données collectées par des capteurs



- message **numérique**

- espace de temps discret, espace de valeurs discret

- ex : texte, entiers

000001010100011111010101

# Signal analogique vs. numérique

- Les signaux sont la représentation physique du message à transmettre.
  - ils se présentent généralement sous la forme d'une grandeur électrique (tension, courant) qui peut ensuite être convertie en une onde électrique ou électromagnétique pour la transmission
- **signal analogique** : signal représentant un message analogique
- **signal numérique** : signal résultant de la mise en forme d'un message numérique
  - il se présente sous la forme d'une succession de formes d'ondes pouvant prendre une parmi un ensemble fini de possibilités utilisées pour coder l'information

# Transmission analogique vs. numérique

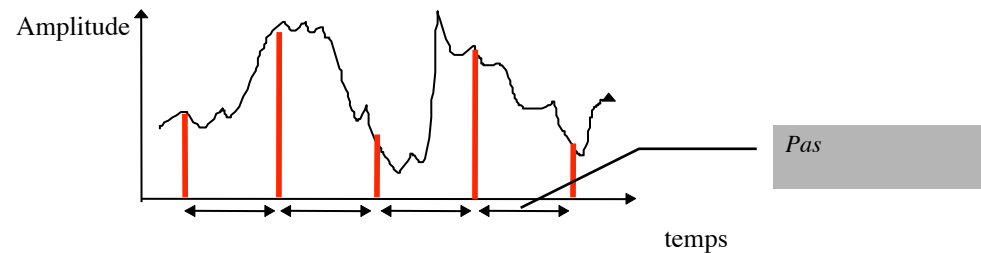
- La transmission est l'opération qui consiste à transporter le signal d'une machine vers une autre, sur un support donné
- transmission analogique
  - transport d'un signal analogique
  - nécessite, sur de longues distances, des amplificateurs
- transmission numérique
  - transport d'un signal numérique
  - nécessite, sur de longues distances, des répéteurs

# La numérisation

- Avantages du numérique sur l'analogique
  - facilités de stockage, de traitement et de restitution
  - intégration (multimédia)
  - faible taux d'erreur des liaisons numériques par rapport aux liaisons analogiques (répéteurs vs. amplificateurs)
  - coût des composants (équipements) numériques inférieur à celui des composants analogiques
- la tendance : traiter des données numériques et les véhiculer par un signal numérique (*le tout numérique*)
- numérisation : transformation d'un message analogique en un message numérique
  - processus en 3 étapes
    - échantillonnage
    - quantification
    - codage

# L'étape d'échantillonnage

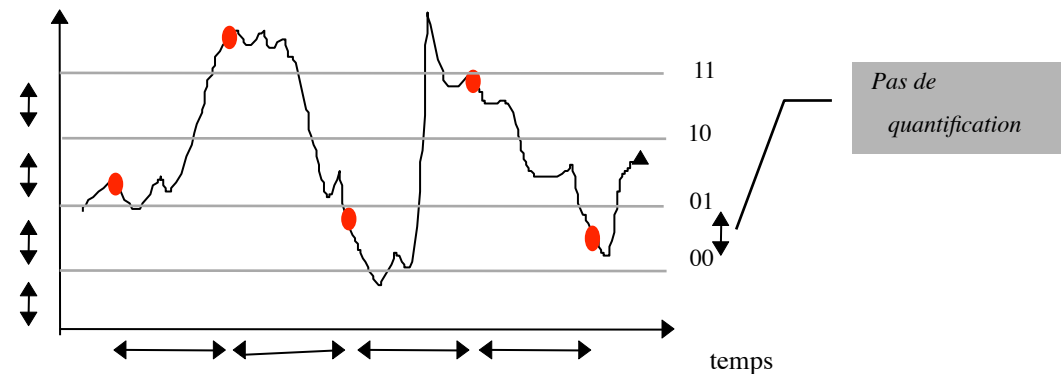
- consiste à prélever périodiquement la valeur du signal analogique
- transformation d'un signal à temps continu en un signal à temps discret



- Théorème d'échantillonnage de **Shannon**
  - L'échantillonnage d'un signal de fréquence maximum  $f_{\max}$  est sans perte si la fréquence d'échantillonnage est :
  - $f_e \geq 2.f_{\max}$
  - pas d'échantillonnage :  $T_e = 1 / f_e$

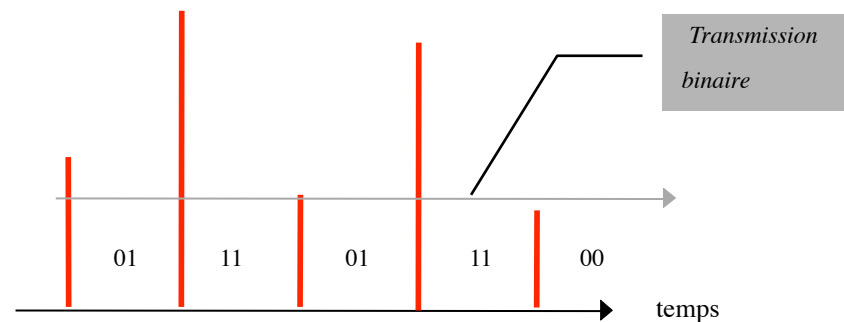
# L'étape de quantification

- consiste à représenter un échantillon par une valeur numérique appartenant à une échelle de quantification
  - introduit une erreur de quantification (d'autant plus importante que le niveau de quantification est faible et que le pas de quantification est grand)
  - utilisation d'échelles logarithmiques
- La quantification donne une suite de valeurs appartenant à un ensemble de cardinal fini



# L'étape de codage

- consiste à remplacer la suite d'échantillons quantifiés par une suite binaire
- s'il y a  $q = 2^n$  niveaux de quantification, il faut  $n$  bits pour coder toutes les valeurs possibles des échantillons quantifiés



# Exemple

- codage MIC (Modulation par Impulsion et Codage) à  $2^8$  niveaux (256 niveaux)
- application à la voix téléphonique
  - support spectral de la voix téléphonique analogique : [300 Hz, 3400 Hz]
  - échantillonnage correct (sans perte de qualité) au moins à  $2 \times 3400$  Hz, valeur "arrondie" par la normalisation à 8000 Hz, soit un échantillon prélevé toutes les 125 ms
  - échantillon codé sur 8 bits → il faut un débit de 64 kbit/s pour transférer de la voix numérique MIC

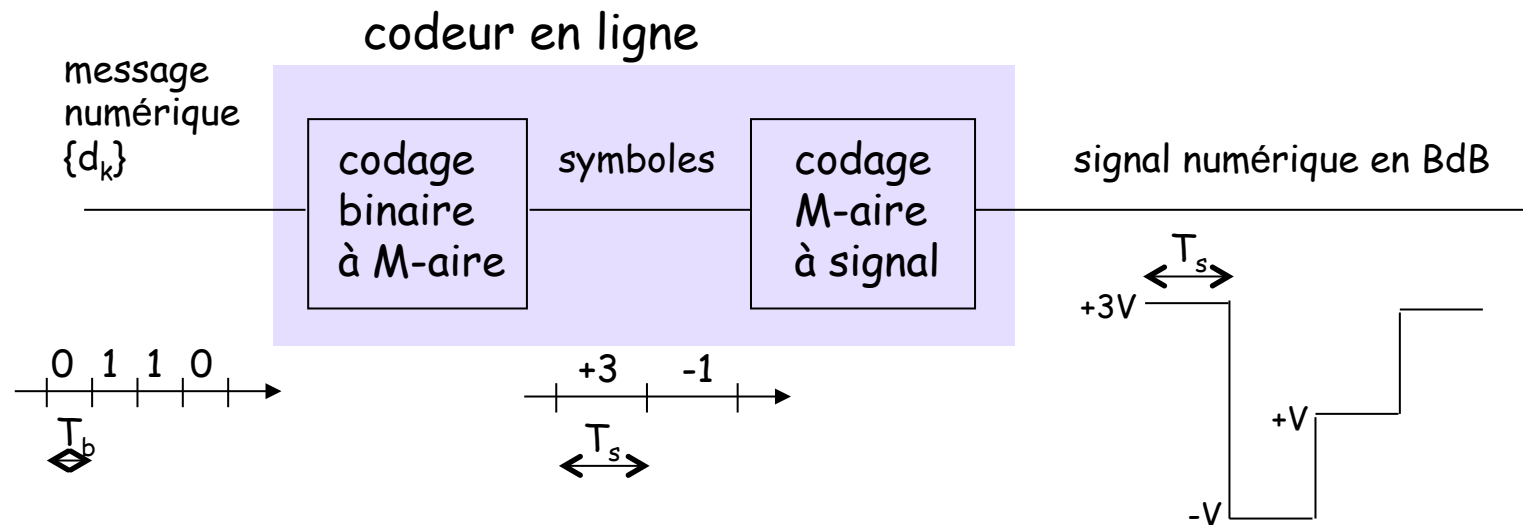


# Circuit de données - Plan

1. Support de transmission
2. Éléments de traitement du signal
3. Numérisation
4. Modes de transmission du signal
5. Circuit de données

# Codage en ligne

- Principe : le codage en ligne associe une représentation physique au message numérique



# Débit binaire et rapidité de modulation

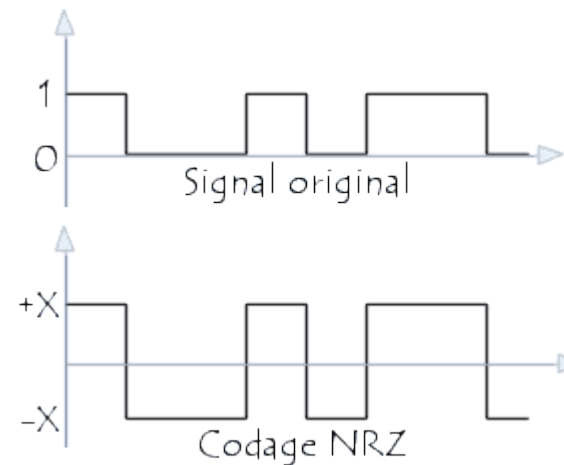
- **débit binaire** ( $D_b$ ) : nombre maximum d'éléments binaires transmis par seconde
  - $T_b$  étant la durée d'un élément binaire, on a
  - $D_b = 1/T_b$  bit/s
- **rapidité de modulation** ( $R_s$ ) : vitesse à laquelle les symboles se succèdent
  - $T_s$  étant la durée d'un symbole (et donc la durée d'un élément de signal), on a
  - $R_s = 1/T_s$  bauds
- **valence** ( $M$ ) : cardinal de l'alphabet des symboles
  - $r$  étant le nombre de bits codés par symbole, on a  
 $M = 2^r$  et donc  $r = \log_2 M$
- $D_b = R_s \cdot r = R_s \cdot \log_2 M$

# Codage en ligne

- Les codages existants utilisent
  - 2 niveaux  $(-X, +X)$
  - 3 niveaux  $(-X, 0, +X)$
- Chacun d'entre eux présente des qualités :
  - d'adaptation à un support
    - support spectral résultant plus ou moins large
    - présence ou non d'une composante continue
  - de résistance aux bruits
    - fonction du nombre de niveaux de signal (valence)
  - de facilité de récupération du rythme à la réception
    - fonction de la possibilité ou non pour le signal de rester à un niveau constant

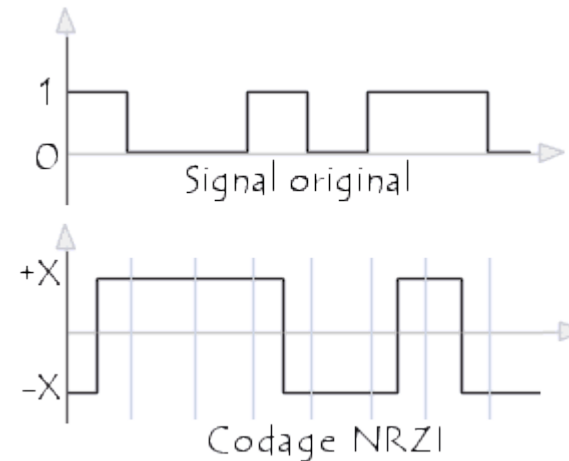
# Codage NRZ

- Non Return to Zero
- Principe
  - $d_k = 0 \rightarrow$  le signal vaut  $-X$
  - $d_k = 1 \rightarrow$  le signal vaut  $+X$
- Avantages
  - la détection de la présence ou non du signal
  - $M = 2$  : bonne résistance aux bruit
- Inconvénients
  - spectre de puissance concentré autour de la fréquence nulle, coupée par de nombreux supports
  - la présence d'un courant continu lors d'une suite de 0 ou de 1, gênant la synchronisation entre émetteur et récepteur



# Codage NRZI

- Non Return to Zero Inverted
- Principe
  - $dk = 1 \rightarrow$  le signal change d'état après le top de l'horloge
  - $dk = 0 \rightarrow$  le signal ne subit aucun changement d'état
- Avantages
  - la détection de la présence ou non du signal
- Inconvénients
  - la présence d'un courant continu lors d'une suite de 0, gênant la synchronisation entre émetteur et récepteur



# Codage de Manchester

## □ Principe

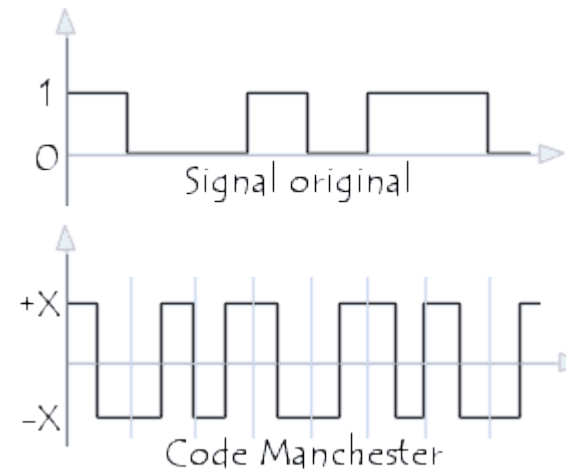
- $dk = 0 \rightarrow$  front montant
- $dk = 1 \rightarrow$  front descendant

## □ Avantages

- spectre ne contenant pas la fréquence nulle
- le non passage par zéro, rendant possible par le récepteur la détection d'un signal
- au moins une transition par intervalle

## □ Inconvénients

- un spectre occupant une large bande



# Codage de Manchester différencié

## ■ Principe

- $d_k = d_{k-1} \rightarrow$  le signal est un front montant
- $d_k \neq d_{k-1} \rightarrow$  le signal est un front descendant
- Convention : bit  $d_0$  d'initialisation nécessaire, par ex.  $d_0 = 1$

## ■ Avantages et inconvénients

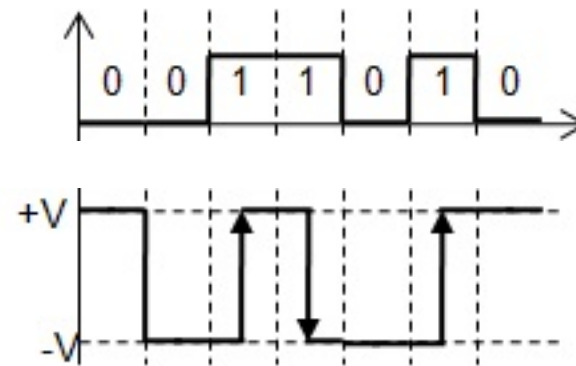
- idem Manchester



# Codage de Miller

## ■ Principe

- $dk = 1 \rightarrow$  le signal est un front montant ou descendant
- $dk = 0 \rightarrow$  si suivi de 1, pas de transition, sinon transition à la fin de l'intervalle
- Convention : initialisation de la première transition, par ex. par un front montant

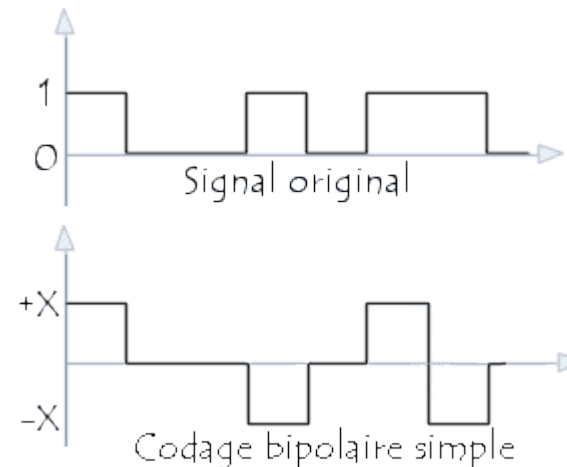


## ■ Avantages

- spectre de puissance réduit
- spectre ne comportant pas la fréquence nulle
- génère moins de transitions que le codage de Manchester

# Codage bipolaire simple

- Principe
  - proche Manchester
  - $d_k = 1 \rightarrow$  le signal est à  $+X$  et  $-X$  alternativement
  - $d_k = 0 \rightarrow$  le signal est à 0
  - Convention : initialisation du premier bit à 1, par ex. une amplitude  $+X$
- Avantages
  - spectre limité
  - plus sensible au bruit que les codages à 2 niveaux
- Inconvénients
  - problèmes d'horloge avec les suites de 0



# Transmission sur fréquence porteuse

## ■ Objectif

- transposer le support spectral du signal BdB dans la bande passante du support centrée sur  $f_0$

## ■ Principe

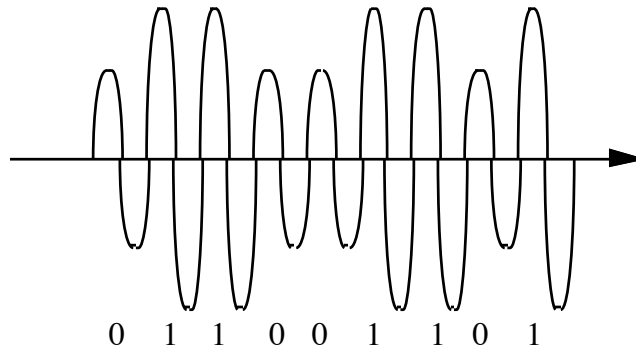
- La transmission est faite par modulation d'une onde porteuse caractérisée par :

$$A \sin (2 \pi f_0 t + \varphi)$$

- Ses paramètres varient en fonction du signal de données (le signal modulant) :
  - en modulation d'amplitude :  $A$  varie
  - en modulation de fréquence :  $f_0$  varie
  - en modulation de phase :  $\varphi$  varie
- Modulation d'amplitude et modulation de phase sont combinables
  - exemple : QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

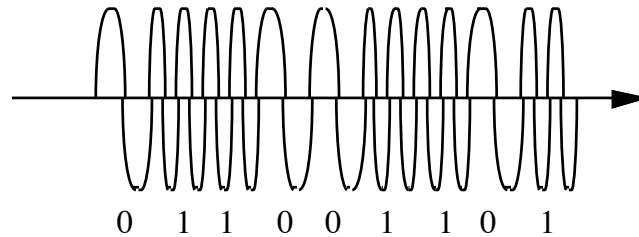
# Modulation d'amplitude

- La modulation d'amplitude associe à chaque symbole (ou élément de signal) à coder une amplitude différente
- ex :  $A = A_0$  pour 0, et  $A = 2 A_0$  pour 1



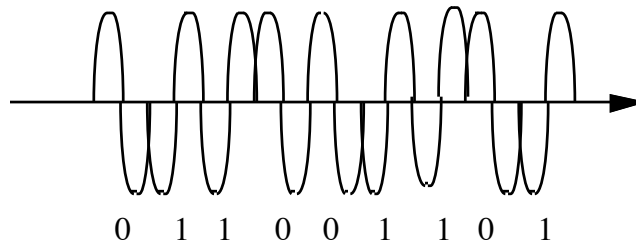
# Modulation de fréquence

- La modulation de fréquence associe à chaque symbole à coder une fréquence différente
- ex :  $f = f_0 - \Delta f$  pour 0, et  $f = f_0 + \Delta f$  pour 1



# Modulation de phase

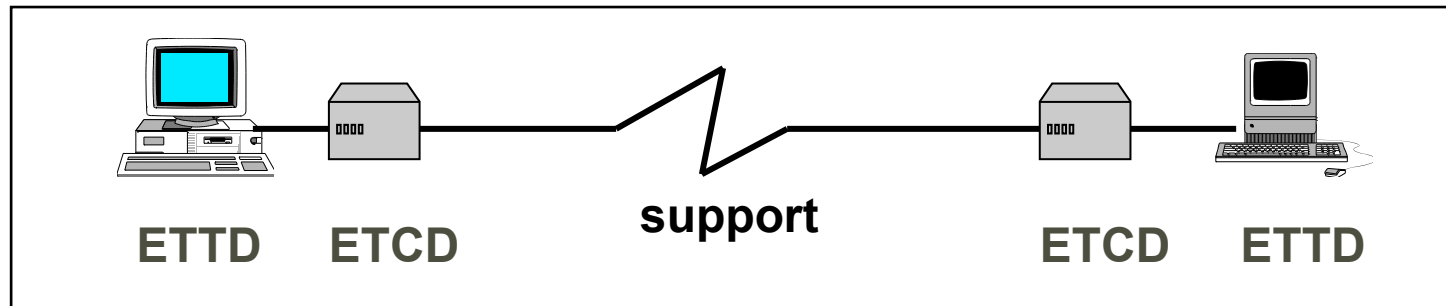
- La modulation de phase associe à chaque symbole à coder une phase différente
- ex :  $\varphi = 0$  pour 0, et  $\varphi = \pi$  pour 1



# Circuit de données - Plan

1. Support de transmission
2. Éléments de traitement du signal
3. Numérisation
4. Modes de transmission du signal
5. Circuit de données

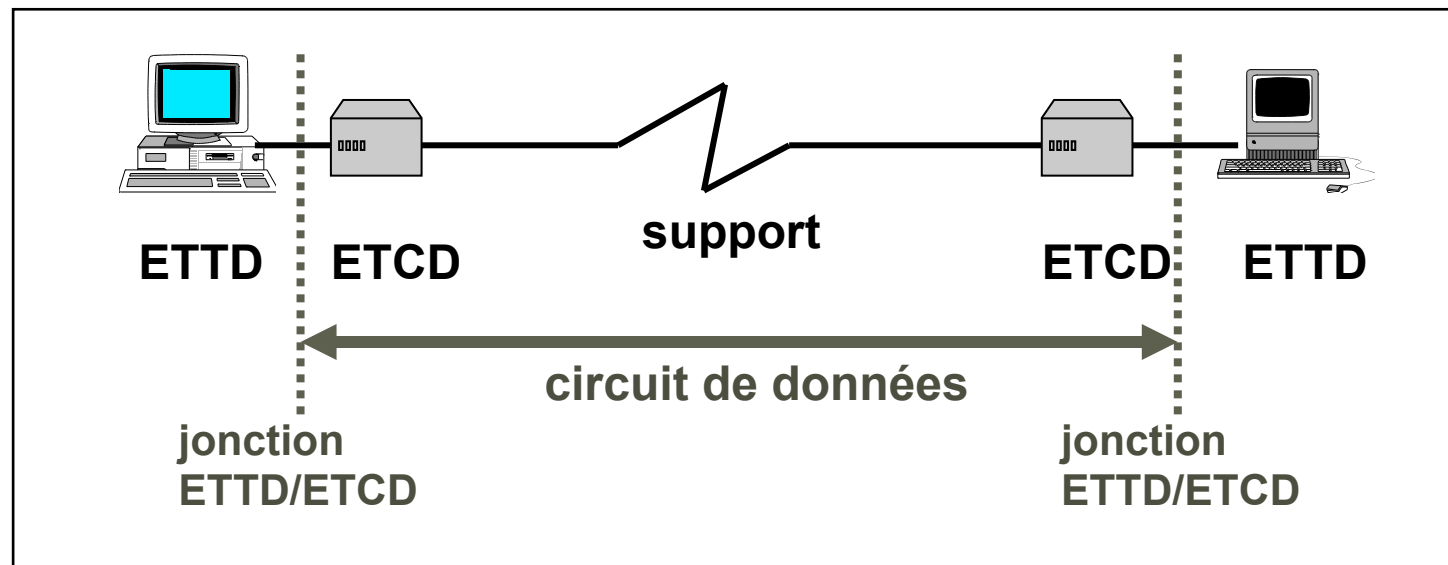
# Définitions



- **ETTD** (Equipement Terminal de Traitement de Données)
  - effectue les traitements sur les données (ainsi que la supervision de la transmission de données)
  - il s'agit d'une station (console, télétype, serveur, poste de travail, etc.)
- **ETCD** (Equipement de Terminaison du Circuit de Données)
  - adapte le signal numérique délivré par l'ETTD aux caractéristiques du support.
  - L'adaptation de l'information consiste en :
    - un codage / décodage bande de base (codec)
    - une modulation / démodulation (modem)



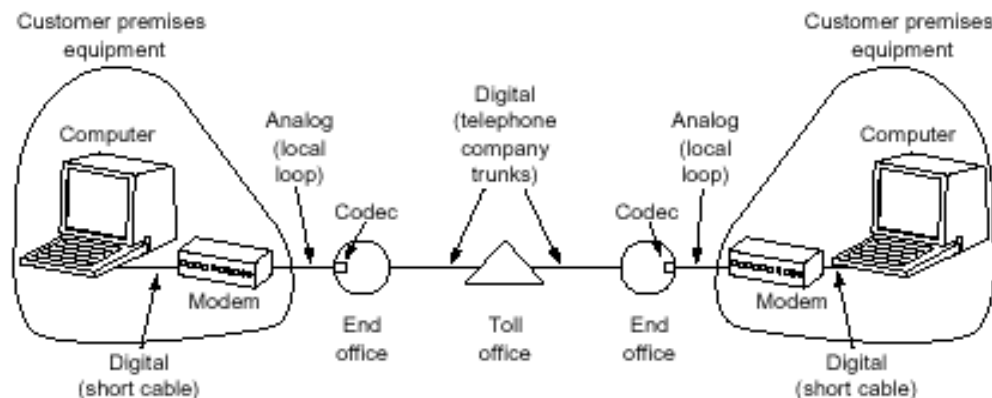
# Définitions



- Le **circuit de données** est composé par l'ensemble des moyens (physiques) permettant le transport d'un signal de données
- La jonction ETDD/ETCD spécifie les caractéristiques de la connexion (interface) physique entre l'ETDD et l'ETCD

# Modems

- acronyme de modulateur-démodulateur
- fonctions de base
  - la fonction modulateur transforme des signaux binaires appliqués en entrée en signaux à fréquence vocale que l'on peut envoyer sur une ligne téléphonique
  - la fonction démodulateur restitue les signaux binaires à partir des signaux sonores reçus
  - pour que 2 correspondants puissent échanger des données via RTC, chacun doit placer un modem entre son ordinateur et sa ligne téléphonique



# Etat de notre architecture

