Second Chapitre

Niveau Physique

Plan du cours physique

- **Transmission sur un canal**
  - **Transmission en bande limitée**
  - **Transmission en présence de bruit**
  - **Détection et correction des erreurs**
  - **Représentation des signaux**
- **Technologie du niveau physique**
  - **Les contrôleurs**
  - **Les interfaces standards**
  - **Les modems**
  - **Les voies de communication**
  - **Les réseaux au niveau physique**
    - **Réseau téléphonique commuté**
    - **Réseaux PDH et SDH**

Rappel des objectifs du niveau physique

- **Définition :**
  - **Transmission effective** des informations binaires sur une voie physique en s'adaptant aux contraintes du support physique utilisé.
- **Problèmes à résoudre**
  - **Problèmes de synchronisation** : délimitation des informations significatives.
  - **Problèmes de modulation** : représentation des bits (électronique ou optique).
  - **Problèmes mécanique** : réalisation des connecteurs (connectique).

Niveau Physique

Première partie

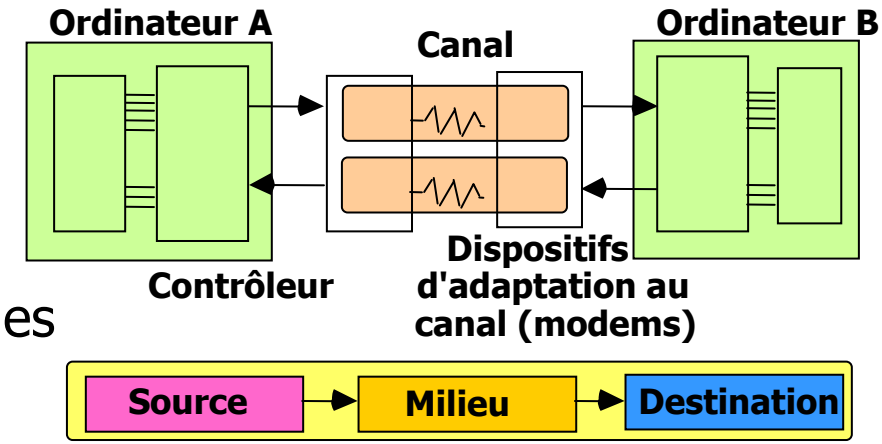
Transmission du signal

Introduction : canal de transmission

- **Disposer d'un support**

Physique qui véhicule les signaux électromagnétiques:

  - fils métalliques => signaux électriques
  - Atmosphère => ondes radio
  - fibre optique => lumière



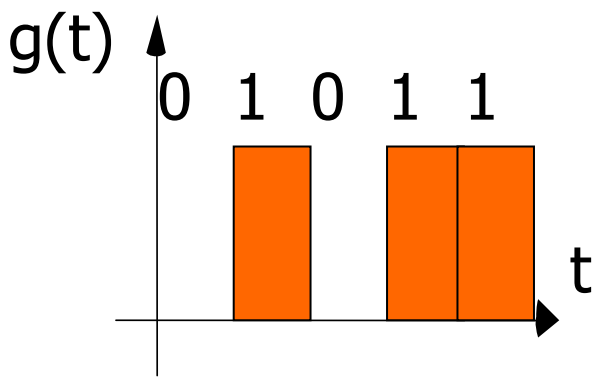
- **Canal de transmission :** une source (dispositif d'adaptation en émission), un médium (un milieu de transmission) et une destination (dispositif d'adaptation en réception).
- **Type de canal de transmission étudié : unidirectionnel** (ou simplexe).

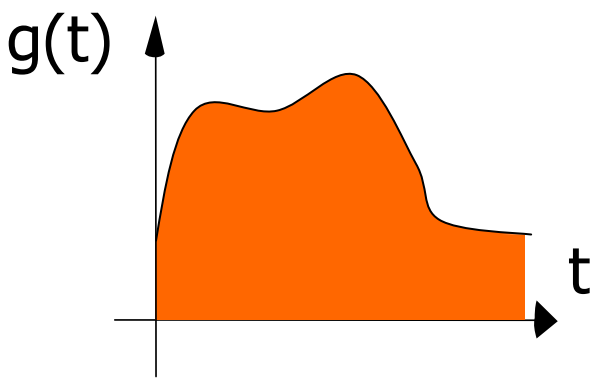
Problème principal du canal : le débit binaire

- **Quel débit d'information peut-être transmis** par un canal de transmission en fonction des caractéristiques de ce canal ?
  - **La bande passante** : bande des fréquences qui sont transmises par le canal.
  - **La déformation du signal** : distorsions apportées par les imperfections de la transmission.
  - **Le bruit** : influences externes provoquées dans le canal par le milieu extérieur.

Etude 1 : Canal sans bruit en bande limitée

- **La bande de fréquence est limitée à une valeur B**.
- **On ne s'intéresse pas au problème des bruits additifs.**
- **La source code** les données à émettre (les bits) par **une fonction g(t)** du temps : une représentation dans le domaine temporel d'un signal numérique ou analogique/continu.





- **Outil de cette étude :** l'analyse de Fourier.
- **Objectif** : Introduire l'importance de la disponibilité d'une large bande passante => passer dans le domaine fréquentiel.

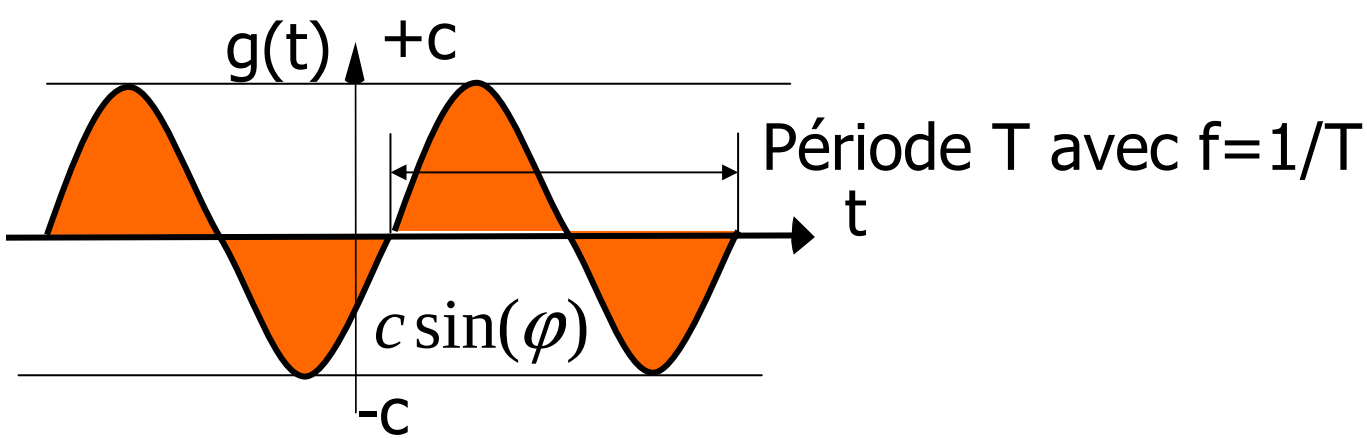
Fonctions sinusoides

- On décompose un signal selon un somme de fonctions sinusoïdes.
- Le signal analogique élémentaire est le sinus (ou le cosinus).

$$g(t) = c\sin(2\pi ft + \varphi)$$

- Signal **périodique** caractérisé par trois paramètres:

  amplitude c, fréquence f, phase φ



a) Cas ou la fonction g(t) est périodique

- **Correspond à une présentation dans un cas très particulier**: g est périodique (par exemple une horloge).
- **g(t) peut-être représentée** comme une somme infinie de fonctions sinus ou cosinus.

$$g(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} c_n \cos(2\pi nft - \varphi_n)$$

  - **f la fréquence** du signal périodique f = 1/T ou T est la période.
  - **Chaque terme** en cosinus est caractérisé par :

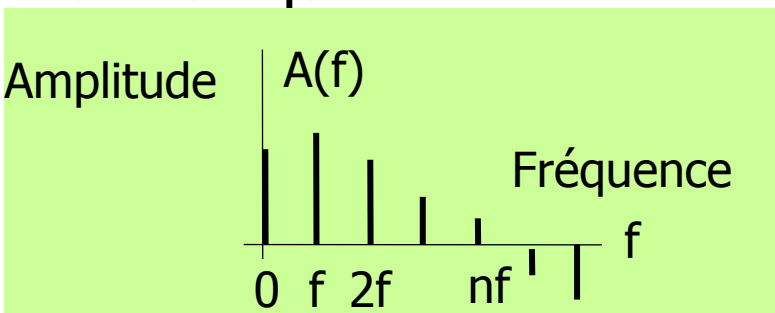
    . nf est une **harmonique** du signal.

    . une composante **d'amplitude:** c_n

    . une composante **de phase**: φ_n

Représentation spectrale

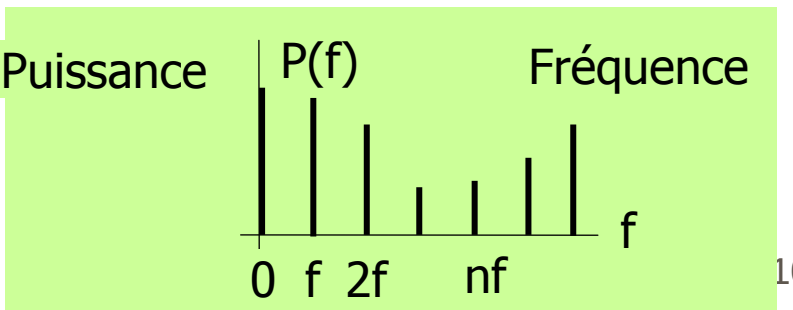
- **Spectre d'amplitude** : Représentation des amplitudes c_n en fonction des fréquences.
- **Fonction périodique=> spectre de raies** : une raie est associée à chaque harmonique.



- **Spectre de puissance** :Représentation des puissances contenues dans les différentes harmoniques.

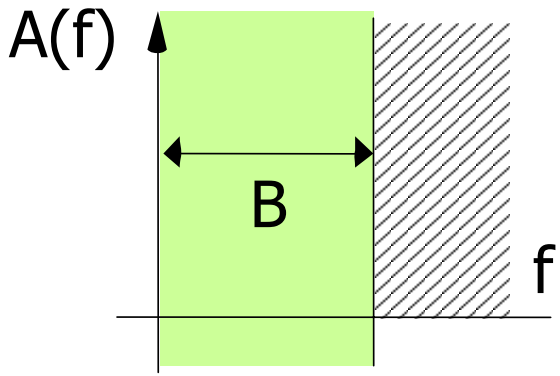
Puissance moyenne d'un signal

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T g(t)^2\,dt = \sum_{n=0}^{+\infty} c_n^2$$

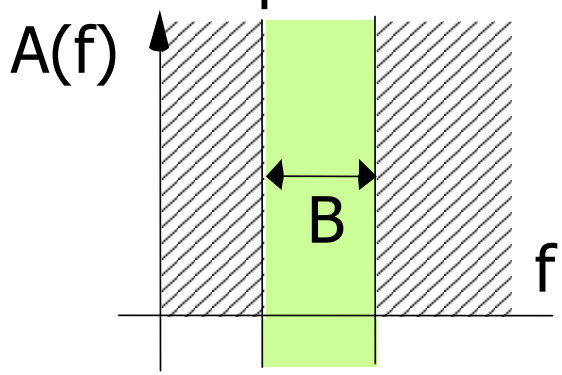


Première application de cette représentation

- **Lorsque l'on transmet un signal on le déforme** de manière différente selon les fréquences.
- **Déformation fondamentale** : on ne transmet jamais toutes les fréquences => **Les fréquences élevées disparaissent.**
- **Un canal se comporte comme un filtre.**
- **Exemple :** Bande passante réseau téléphonique commuté 300-3400 Hz

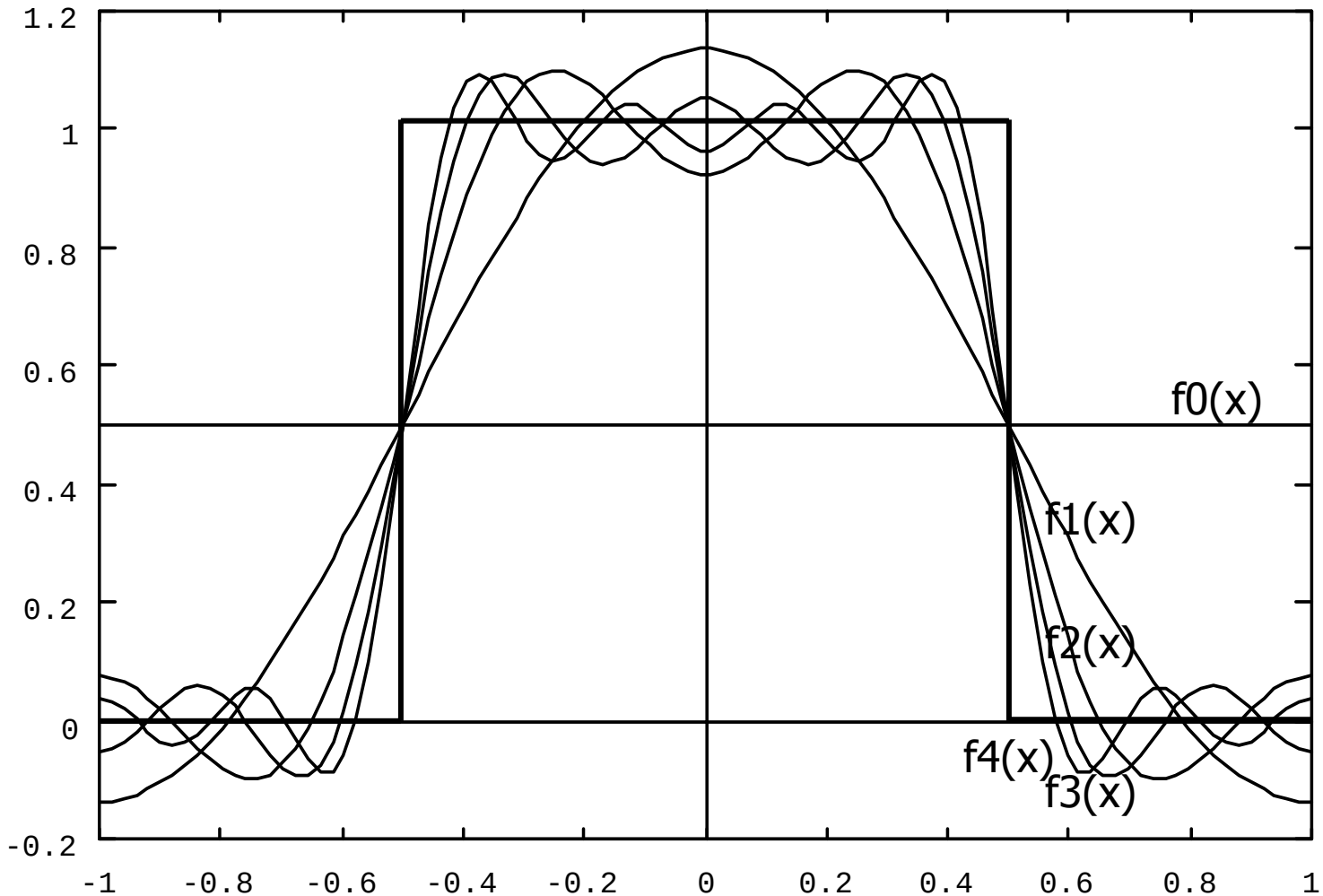


Filtre passe-bas



Filtre passe-bande

Distorsion due à la suppression des fréquences élevées sur une horloge



b) Cas ou la fonction g(t) est non périodique

- **Intégrale de Fourier**
- Un signal **non périodique** peut être mis sous la forme d'une intégrale de fonction sinusoïdale:

$$g(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} S(\omega) \cos(\omega t - \varphi(\omega)) d\omega$$

- **Spectre continu** : Pour toutes les fréquences f (avec $\omega = 2\pi f$ la pulsation) on a :
  - une amplitude $S(\omega)$
  - une phase $\varphi(\omega)$

Notion de fonction de transfert

- **Canal par nature imparfait** => chaque composante est déformée de façon différente selon la fréquence.
- **Fonction de transfert du canal A(ω), B(ω) .**
  - **Atténuation en amplitude : A(ω)** le coefficient multiplicatif qui caractérise l'atténuation en fonction de la fréquence (résistance, dispersion d'onde).
  - **Retard de phase : B(ω)** le coefficient additif caractérisant le retard en fonction de la fréquence.
- **Modifications apportées au signal:** Si le signal g(t) est émis, le signal reçu est alors r(t):

$$g(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} S(\omega) \cos(\omega t - \varphi(\omega)) d\omega$$

$$r(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} A(\omega) S(\omega) \cos(\omega t - \varphi(\omega) + B(\omega)) d\omega$$

Mesure de l'atténuation: le décibel

- **L'atténuation** (affaiblissement) **est une perte de puissance** qui s'exprime en décibels:

  $S=10*\log_{10}(PS/PE)$ (valeur négative).

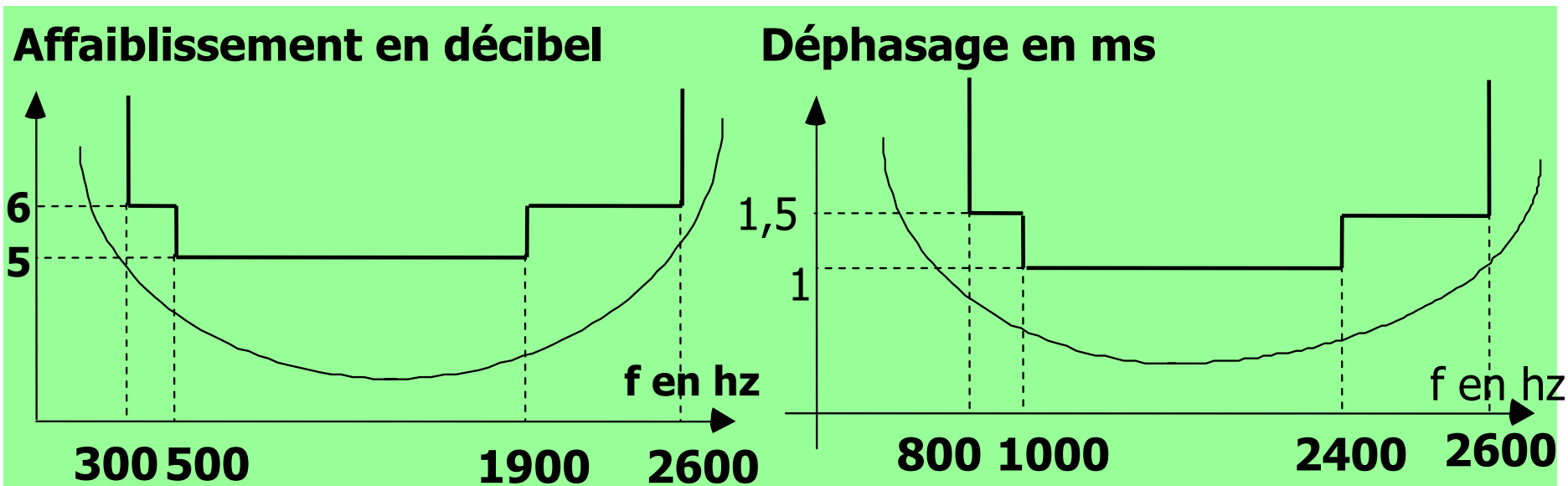
- **Le décibel est la représentation en logarithmes** d'un rapport de puissances (meilleure échelle, et les pertes en cascade s'exprime par des additions).
  - On peut aussi exprimer les pertes sur des tensions
  - $N=20*\log_{10}(TS/TE)$ puisque $P=U^2/R$.
- **Une puissance de signal** peut être donnée en décibel par watt ou par milliwatt dBmW:

  $SdBmW=10*\log_{10}P$ (ou P est en milliwatt).

- **Pour contrecarrer l'affaiblissement** on utilise des amplificateurs qui procurent un gain.
  - $G=10*\log_{10}(PS/PE)$ a une valeur positive.

Engagements contractuels sur les voies de communication

- **Notion de gabarit** : Performance les plus mauvaises offertes par la voie en termes d'atténuation et de déphasage: les gabarits.
- **Exemple:** Gabarit de réseau téléphonique commuté



Résultat d'échantillonnage de Shannon, Nyquist

- **B La largeur de bande d'un filtre en hertz** : on transmet un signal au travers de ce filtre.
- **R La rapidité de modulation en 'bauds'** : le nombre d'intervalles élémentaires par unité de temps (secondes) qui permettent l'échange d'un échantillon (d'un symbole).
- **V La valence d'un signal échantillonné :** le nombre de symboles différents qui peuvent être distingués par intervalle.
- **Q La quantité d'information par intervalle** en '**bits**'

$$Q = \log_2 V$$

- **C Le débit maximum d'informations en 'bits/seconde'**

$$C = R \log_2 V = 2B \log_2 V$$

Interprétation de Shannon, Nyquist

- **Théorème d'échantillonnage**
  - Un signal peut (théoriquement) être reconstruit à partir d'une fréquence d'échantillonnage égale à deux fois la largeur de bande (deux fois la fréquence maximale du signal pour un filtre passe-bas).
  - Soit encore : toutes les fréquences inférieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage peuvent être exactement restituées.
  - Exemple : Le son CD est échantillonné 44100 fois par seconde => on ne peut restituer correctement que les fréquences de 0 à 22050 Hz.

- **Résultat de débit maximum** pour un signal à support de largeur de bande B.
  - Le débit maximum théorique est atteint pour R = 2B (en échantillonnant 2B fois par unité de temps on atteint le débit maximum).
  - Dans une bande B pour augmenter le débit au il faut augmenter V la valence (le nombre de symboles par intervalles élémentaires).

Etude 2: Transmission en présence de bruits.

- **Objectif de la théorie de l'information de Shannon**
  - Modéliser un canal soumis à un bruit additif.
  - Déterminer la capacité maximum de transmission d'un canal

- **Origine des bruits**
  - **Thermiques :** Bruit de fond des résistances.
  - **Diaphoniques :** Influence permanente d'un conducteur sur un autre.
  - **Impulsionels :** Influences transitoires des impulsions
  - **Harmoniques :** Phénomènes de battements, de réflexions.

Entropie d'une source

- **Hypothèses :**
  - Une source émet des messages (ou symboles) pris dans un ensemble (un alphabet) donné fini (cas infini non traité ici)

$$X = x_1, x_2, x_3, ..., x_k, ..., x_M$$

  - Les messages émis sont aléatoires sinon il n'y a pas de communication d'information => Ensemble des **probabilités a priori**

$$p(x_1), p(x_2), p(x_3), ..., p(x_k), ..., p(x_M)$$

- **L'entropie d'une source H** : c'est la quantité d'information moyenne apportée par la source
  - Quantité d'information apportée par le message k : $-\log_2 p(x_k)$
  - Quantité moyenne : espérance mathématique pour tous les messages possibles :

$$H = -\sum_{k=1}^{M} p(x_k) \log_2 p(x_k)$$

Influence du bruit: probabilités a posteriori

- **Le récepteur reçoit des messages** qui appartiennent à un ensemble qui n'est pas nécessairement identique à celui émis par la source.

$$Y = y_1, y_2, y_3, \ldots, y_i, \ldots, y_N$$

- **Le bruit intervient pour modifier un message** émis xk en un message reçu yi selon une probabilité **a posteriori** (probabilité conditionnelle) : la probabilité que l'émetteur ait envoyé xk sachant que le récepteur a vu arriver yi

$$p(x_k / y_i)$$

Information mutuelle et capacité d'un canal

- **Information mutuelle de deux messages émis et reçus**
  - La quantité d'information apportée lorsqu'on reçoit yi alors que xk a été émis:

$$I(x_k, y_i) = \log_2\left(\frac{p(x_k / y_i)}{p(x_k)}\right)$$

  - Exemples: Si y_i et x_k sont indépendants $I(x_k, y_i)=0$

    Si $p(x_k/y_i)=1$ on retrouve $-\log_2(p(x_k))$
- **Information mutuelle moyenne** : source/destinataire

$$I(X,Y) = \sum_X \sum_Y p(x_k et\ y_i) I(x_k, y_i)$$

- **Capacité d'un canal** : La valeur maximum de l'information mutuelle moyenne sur toutes les distributions a priori.

$$C = \max_{p(x_k)} I(X,Y)$$

Résultats de Shannon

- **Premier résultat de Shannon : une source n'est caractérisée que par son entropie.**
  - On ne change rien sur l'information générée par la source en changeant de codage.
  - La seule mesure de l'information qui compte est l'entropie (son débit en bit/unité de temps).
- **Second résultat de Shannon : débit maximum C**
  - **Si H $\leq$C** il existe une codification des messages qui sur une période suffisamment longue permet de transmettre les messages avec une probabilité d'erreur résiduelle aussi faible que l'on veut.
  - **Si H>C** il n'existe pas de codification qui assure sur une période de durée arbitraire une transmission sans erreurs.

Interprétation de Shannon

- **Dans le premier cas : capacité du canal excédentaire**
  - Sur une longue période cet excédent est **important.**
  - Il permet d'ajouter des **redondances** (sans changer l'entropie de la source) => On peut générer des codes correcteurs d'erreur aussi efficaces que l'on veut.
  - On abaisse ainsi le taux d'erreur résiduel **arbitrairement.**
- **Dans le second cas : capacité du canal déficitaire**
  - Sur une période courte on peut transmettre correctement mais ensuite on aura des erreurs non corrigées.
  - Avant ce résultat on pouvait penser que le bruit introduisait une borne **infranchissable** sur le taux d'erreur résiduel.
  - Shannon montre que le **bruit intervient sur le débit du canal et non sur sa précision.**

Obtention d'un débit élevé

- Pour **augmenter** le débit d'un canal à taux d'erreur donné on peut:
  - **Augmenter la complexité de codage** des équipements terminaux pour se placer au plus près de la capacité maximale (des limites du théorème).
  - **Augmenter la capacité du canal** (bande passante, puissance) en conservant des techniques de codage simples.
  - **Jouer sur les deux aspects.**

Résultat particulier de Shannon

- **Canal de bande passante limitée** : B.
- **Puissance moyenne du signal** : S
- **Puissance moyenne d'un bruit additif** : N.

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

  - **Bruit blanc**: énergie répartie de façon uniforme sur le spectre
  - **Gaussien**: l'apparition d'un bruit suit une loi de Gauss.
  - **Exemple**: B= 3100 Hz 10 $\log_{10}$ S/N = 20 db

    S/N = 100 C = 3100 * 6,6 = 20600 b/s
- **Remarque**: Dans ce cas Shannon montre que le nombre de niveaux max V qui peuvent être discriminés est donné par:
  - 2B $\log_2$ V = B $\log_2$ (1 + S/N)

$$V = \sqrt{1 + \frac{S}{N}}$$

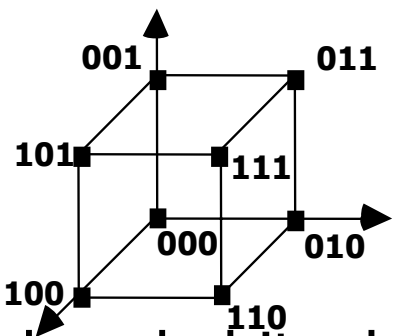
Niveau Physique

Détection et correction des erreurs

Introduction: Généralités concernant les codes de blocs

- **Existence de bruits** qui perturbent les transmissions.
  - **Suite binaire émise M** : un n uple binaire (un bloc).
  - **Suite binaire reçue M'=> M'≠M** (des bits sont modifiés).
- **Distance entre deux messages**

$$d(M,M') = \sum_i \left| M(i) - M'(i) \right|$$



  - **Distance de Hamming** : c'est le nombre de bits dans M et M' qui sont différents.
  - **Géométriquement :** c'est une distance dans l'espace à n dimensions entre les points M, M'.

Solution 1: Détection des erreurs et retransmission

- **Une idée de redondance temporelle (dans le temps).**
- **A) Détection d'erreur par adjonction de redondances** : à tous les messages x_i transmis on ajoute $f(x_i)$.

$$\{ x_i \} \dashrightarrow \{ y_i = (x_i \ , f(x_i)) \}$$

- **B) Vérification de f par le récepteur** : un message reçu y_j

$y_j = (x_j , z_j)$ est correct si $z_j = f(x_j)$.

- **C) Retransmission si erreur.**
- **Notion de code :** A partir de l'ensemble des symboles à émettre x_i on créé un ensemble y_i de messages émis: **un code.**
- **Notion de distance d'un code** : c'est la plus petite distance entre deux symboles différents (distance des messages les plus proches $\inf_{j,k}[d(y_j, y_k)]$
  - **Un code de distance D est détecteur de D-1 erreurs.**
  - **Des erreurs de distance supérieure à D-1 peuvent ne pas être détectées.**

Solution 2: Correction des erreurs (codes correcteurs)

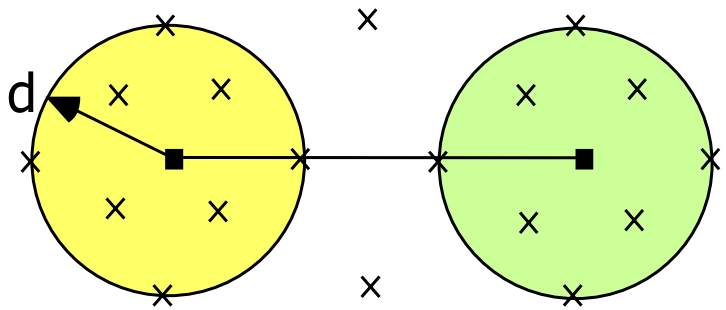
- **Une idée de redondance spatiale (masquage d'erreur).**
- **A) Comme précédemment adjonction de redondances** : à tous les messages x_i transmis on ajoute $f(x_i)$.
- **B) Vérification de f par le récepteur** : si un message reçu y_j appartient au code on l'accepte.
- **C) Correction immédiate** quand le message reçu est erroné

  Message faux $y_j = (x_j , z_j)$ avec $z_j \neq f(x_j)$.
  - On fait l'hypothèse que **le bruit altère probablement un petit nombre de bits.**
  - On **corrige un message erroné par le mot du code correct le plus proche** du message erroné reçu.

$$(x_i, f(x_i)) = \inf_k (d((x_k, f(x_k)),(x_j, z_j))$$

Codes correcteurs: représentation géométrique

- On trace des sphères centrées sur chaque mot d'un code (les messages corrects) de rayon d (distance de Hamming).



Messages corrects: carrés noirs

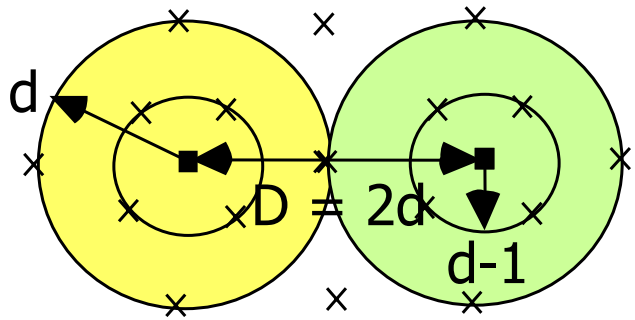
Messages incorrects : croix.

- **Les erreurs de faible poids** (portant sur un petit nombre de bits) ont une probabilité d'apparition forte par rapport aux erreurs de fort poids => **correction des messages** dans une sphère **par le message au centre de la sphère.**
- **Possibilité de faire des erreurs de correction** si le poids des erreurs est trop élevé.

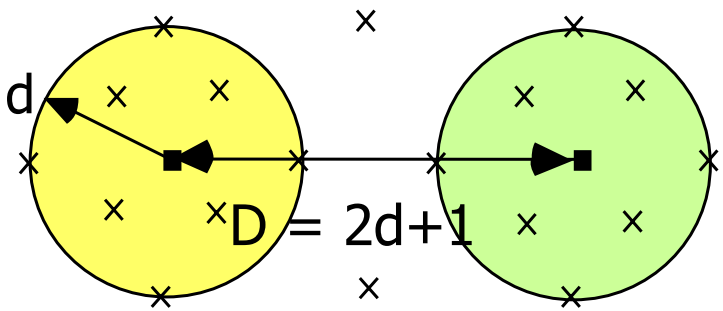
Codes correcteurs: Nombre d'erreurs corrigées

- **Code correcteur de distance D.**

- **Si D=2d :** correction des erreurs de poids **d-1.**



- **Si D=2d+1 :** correction des erreurs de poids **d.**



- **Problème de construction d'un code correcteur**: écarter les mots du code dans l'espace, le plus possible et de façon régulière (par le choix de la fonction de redondance f).

Paramètres d'un code

- a) Taux d'erreur brut
  - Qualité de la voie
- b) Efficacité d'un code
  - En détection
- c) Taux d'erreur résiduel
  - Erreurs non détectées ou non corrigées
- b) Rendement d'un code
  - Surcharge due au codage

$$t = \frac{\text{Nombre de messages faux}}{\text{Nombre de messages total}}$$

$$e = \frac{\text{Nombre de messages reconnus faux}}{\text{Nombre de messages total}}$$

$$q = \frac{\text{Nombre de messages finalement faux}}{\text{Nombre de messages total}}$$

$$r = \frac{\text{Nombre de bits utiles reçus}}{\text{Nombre total de bits transmis}}$$

Exemple 1 de codes : Codes linéaires en blocs

- **Mots du code (blocs):** ensemble de n-uples binaires (vecteurs de n bits) formant un espace vectoriel sur (0,1) pour les opérations ou exclusif $\oplus$, et logique . (notion de corps de Galois à deux éléments GF(2)).

$\oplus$	0	1
0	0	1
1	1	0

.	0	1
0	0	0
1	0	1

- **Notion d'espace vectoriel :** Si X_1 et X_2 appartiennent au code
  - $X_1 \oplus X_2$ appartient au code.
  - Quelque soit k scalaire $k.X_1$ appartient au code => ici 0 appartient au code.

Matrice de génération d'un code linéaire

- **Matrice** G rectangulaire qui fait correspondre à un message Y de k bits un mot du code X de n bits (G a k lignes, n colonnes).

$$X_{(1,n)} = Y_{(1,k)} \cdot G_{(k,n)}$$

- **G ajoute une redondance** de m= n-k bits.
- **Exemple:** le contrôle de parité (code linéaire le plus simple).

$$(x_1, \dots, x_k, x_{k+1}) = (x_1, \dots, x_k) \begin{bmatrix} 1 & & 0 & 1 \\ & \ddots & & \vdots \\ & & 1 & 1 \\ 0 & & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$x_{k+1} = x_1 \oplus x_2 \dots \oplus x_k$$

- **Notion de code séparé** : Bits d'informations, puis bits de redondance (contrôle, parité).
  - G est de la forme $G = [I_{k,k} P_{k,n-k}]$ $X = (y_1, y_2, \dots, y_k, x_{k+1} \dots, x_n)$

Matrice de contrôle d'un code linéaire

- **V' l'espace orthogonal de V** : tout mot du code X dans V a **un produit scalaire nul** avec tout vecteur X' dans V'.
- **Tout message X' en erreur** (n'appartenant pas au code) **appartient à V'**.
- **Tout message X' (en erreur)** a un produit scalaire non nul avec au moins un vecteur V'
- **Soit H (n, n-k)** la matrice génératrice de l'orthogonal : la matrice formée au moyen des vecteurs d'une base de V'.
- **Syndrome d'erreur d'un message:** $S = X H$
  - Si **S = 0** le message est présumé **correct**
  - Si **S** différent de **0** le message est **erroné.**

Construction de la matrice de contrôle

- **Très facile** : pour les codes séparés
  - On vérifie que si $G = [\, I_{k,k} P_{k,n-k} \,]$
  - Alors $H = \begin{bmatrix} P_{k,n-k} \\ I_{n-k,n-k} \end{bmatrix}$
- **Exemple** du contrôle de parité: $G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ & \ddots & 1 \\ 0 & & 1 \end{bmatrix}$

$H^T = [\, 1\ 1\ \ldots\ 1\ 1\ 1 \,]$

$S = (X_1, \ldots, X_{K+1})H$

$S = X_1 \oplus \ldots \oplus X_{K+1}$

- **Application** : codes de Hamming (mémoires)

Exemple 2 de codes : Codes polynomiaux

Principe de la génération de la redondance.

- A un message par exemple 1 1 0 1 1 1 on associe un polynôme -->

$$x^5 \oplus x^4 \oplus x^2 \oplus x \oplus 1$$

- On veut ajouter deux bits de redondance on multiplie par x2 -->

$$x^7 \oplus x^6 \oplus x^4 \oplus x^3 \oplus x^2$$

- On choisit un polynôme générateur de degré inférieur au degré du polynôme message:
- Exemple : $x^2 \oplus x \oplus 1$

Les bits de redondance ajoutés au message sont les coefficients du polynôme reste dans la division du polynôme message par le polynôme générateur.

$$\begin{array}{l|l} x^7 \oplus x^6 \oplus \quad x^4 \oplus x^3 \oplus x^2 & x^2 \oplus x \oplus 1 \\ \underline{x^7 \oplus x^6 \oplus x^5} & \\ \quad x^5 \oplus x^4 \oplus x^3 \oplus x^2 & x^5 \oplus x^3 \oplus 1 \\ \quad \underline{x^5 \oplus x^4 \oplus x^3} & \\ \qquad\qquad x^2 & \\ \qquad\qquad \underline{x^2 \oplus x \oplus 1} & \\ \qquad\qquad\quad x \oplus 1 & \end{array}$$

- Le message transmis est donc: 1 1 0 1 1 1 1 1

Codes polynomiaux: Présentation formelle

- **Message de k bits** : M
- **Polynôme associé au message M(x) de degré k-1**: On décale de m positions → $x^m M(x)$
- **G(x) le polynôme générateur** du code de degré m.
- **On effectue la division:** $x^m M(x) = G(x) Q(x) \oplus R(x)$
- **On obtient un reste R(x**) de degré m-1 au plus qui a la propriété suivante. $x^m M(x) \oplus R(x) = G(x) Q(x)$
- **L'ensemble des polynômes** $x^m M(x) \oplus R(x)$ forment **un code polynomial** (tout **mot du code donne un reste nul** dans la division par G(x))
- **Tout mot hors du code** (message erroné) **donne un reste non nul**.

Codes polynomiaux: Propriétés

- **Nombreuses propriétés** des codes polynomiaux: 2 exemples.
- **A) Un code polynomial détecte toute erreur simple.**
  - Une erreur simple est une erreur additive de la forme: $E(x)=x^i$
  - Pour que cette erreur soit indétectée, E(x) doit être divisible par G(x).
  - Si G(x) a plus d'un seul terme il ne peut être diviseur de E(x).
- **B) Un code polynomial qui génère m bits de redondance détecte toutes les rafales d'erreurs de longueur < m.**
  - Une rafale de longueur k est une erreur additive de la forme:
    $$E(x)=x^i\,(x^{k-1}\oplus x^{k-2}\oplus \ldots \oplus x^2\oplus x\oplus 1)$$
  - Pour que cette erreur soit indétectée, E(x) doit être divisible par G(x).
  - A) Si G(x) a un terme constant il ne peut pas avoir x^i en facteur.
  - B) Si k-1 est plus petit ou égal à m-1 le degré de
    $$(x^{k-1}\oplus x^{k-2}\oplus \ldots \oplus x^2\oplus x\oplus 1)$$
    est inférieur au degré de G(x) et G(x) ne peut donc le diviser.

Codes polynomiaux: Exemples de polynômes

- **CRC-12** : Définition d'un polynôme générant 12 bits de redondance (systèmes télécoms, caractères 6 bits).

$$G(x)=x^{12}\oplus x^{11}\oplus x^{3}\oplus x^{2}\oplus x\oplus 1$$

- **Avis V41 CCITT** : Définition d'un polynôme CRC-CCITT (protocoles de liaisons en point à point dérivés de HDLC).

$$G(x)= x^{16}\oplus x^{12}\oplus x^{5}\oplus 1$$

- **CRC-IEEE 802** : Définition d'un polynôme générant 32 bits de redondance pour les réseaux locaux: Ethernet, Wifi.

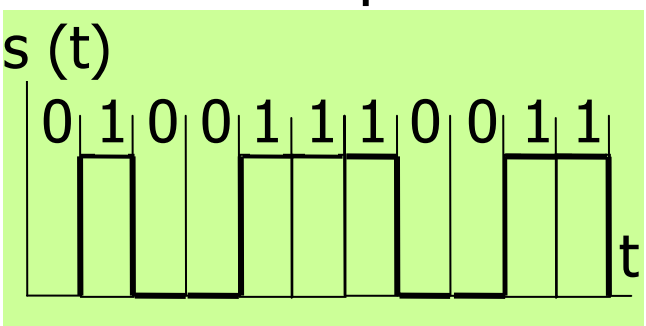
$$G(x)=x^{32}\oplus x^{26}\oplus x^{23}\oplus x^{22}\oplus x^{16}\oplus x^{12}\oplus x^{11}\oplus x^{10}\oplus x^{8}\oplus x^{7}\oplus x^{5}\oplus x^{4}\oplus x^{2}\oplus x\oplus 1$$

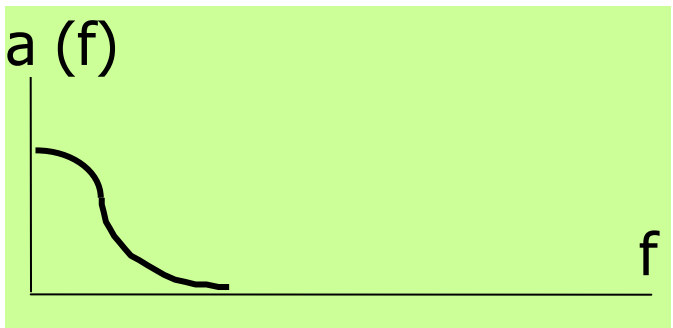
Niveau Physique

Représentation des signaux : Synchronisation, Modulation

Introduction : Transmission en bande de base

- On s'intéresse à une **transmission série.**
- Le signal est dans **sa représentation de base** (tel qu'il est généré par un système informatique).
- **Exemple type:** le codage NRZ-L en représentation temporelle et fréquentielle.

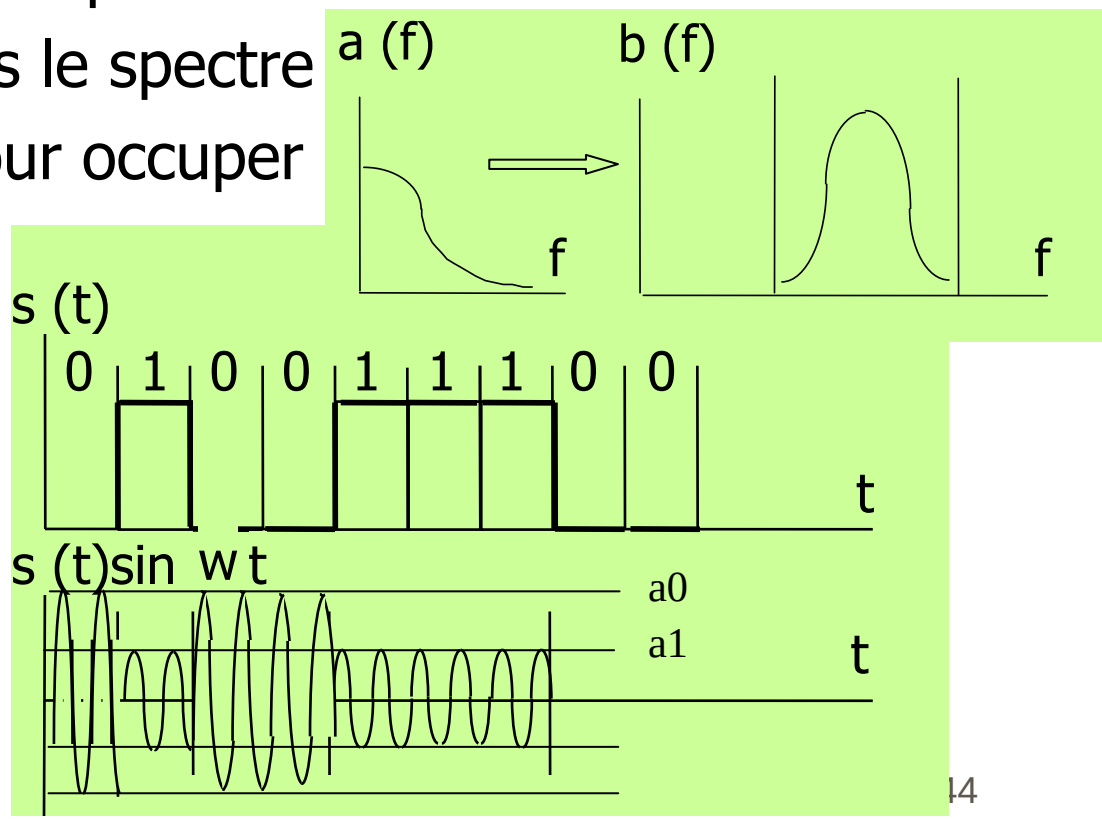




- **Le signal occupe une bande de fréquence** 'naturelle' en fonction de sa représentation et il est envoyé directement sous cette forme dans un médium de communication.

Transmission en modulation

- **Modulation (d'onde porteuse)** Le signal s(t) est représenté au moyen d'une onde porteuse qui modifie le codage de base pour s'adapter à un canal de transmission.
  - Positionnement dans le spectre
  - Remise en forme pour occuper la bande disponible.



- **Exemple type:**

la modulation d'amplitude

Introduction : Problèmes de synchronisation

- **Le récepteur d'un signal doit connaître la position** de chaque bit pour échantillonner correctement les valeurs.
- **Nombreuses difficultés:**
  - **Echantillonnage des bits** en présence de multiples aléas de fonctionnement (gigue, dérive entre les horloges, délais de propagation,...).
  - **Détermination du début des suites binaires** significatives (notion de trames de bit).

Terminologie concernant les signaux (1)

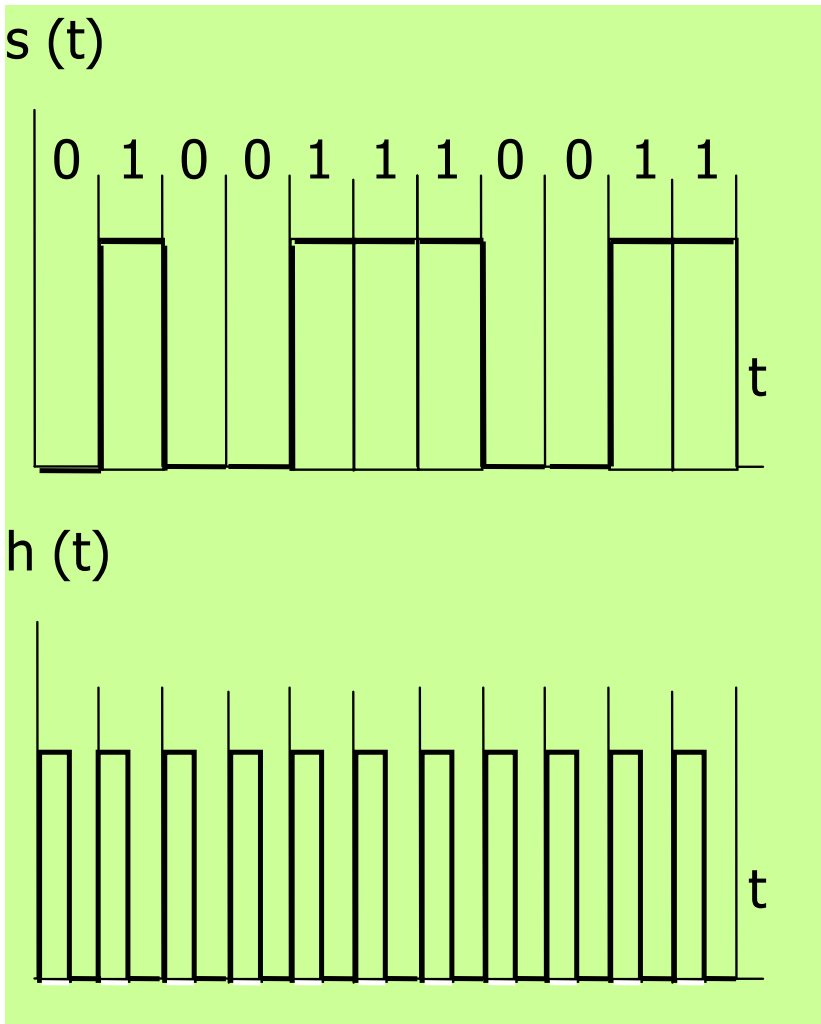
- **Signaux Isochrones** (égaux)
  - **Il existe un écart fixe** entre deux signaux successifs.
  - **Exemple son** : le réseau téléphonique échantillons de 8 bits isochrones selon un intervalle de 125 microseconde.
  - **Exemple image** : codage vidéo à 50 images par seconde images espacées de 40 millisecondes.
  - **L'intervalle constant** doit être reproduit fidèlement chez le récepteur sous peine de perte de qualité de la restitution.
- **Signaux anisochrones** (non égaux)
  - Il n'y a **pas d'intervalle fixe** entre les signaux.
  - Il peut être très important de **restituer l'espacement variable** de l'émission lors de la délivrance au récepteur (contraintes temps réel).

Terminologie concernant les signaux (2)

- **Signaux synchrones** (ensembles)
  - Des signaux synchrones sont à la même cadence (sont rythmés par la **même horloge**).
- **Signaux asynchrones** (antonyme du précédent)
  - Des signaux asynchrones n'apparaissent pas selon un rythme constant défini par une horloge mais apparaissent **aléatoirement**.
- **Signaux plésiochrones** (voisins)
  - Des signaux plésiochrones sont rythmés par des horloges dont les **fréquences** sont **peu différentes** (plésio = voisin).

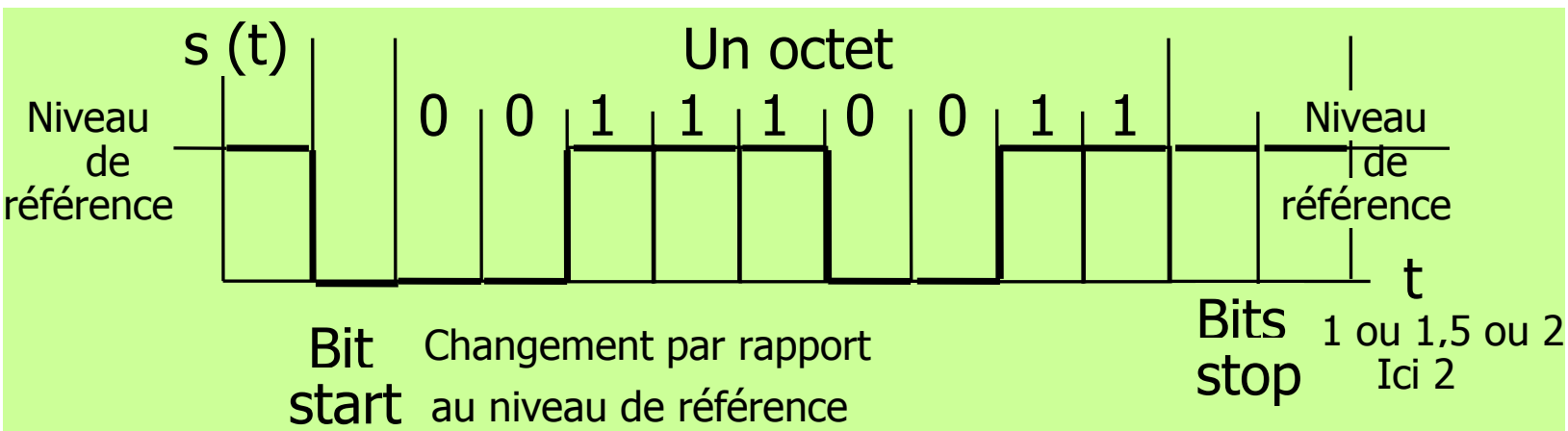
Transmission synchrone

- **Horloge transmise sur un canal** spécial entre émetteur et destinataire.
  - **Les deux sites utilisent la même base de temps**
    => Génération et échantillonnage selon le même rythme.
  - **Nécessite une bonne qualité d'acheminement de l'horloge**
    => Solution assez coûteuse en bande passante nécessitant un canal spécial pour l'horloge.



Transmission asynchrone ‘Start Stop’

- **Pas d'horloge commune =>**asynchronisme sur l'instant de commencement d'une suite binaire.
- **On ne transmet que des suites binaires courtes isochrones** (en fait des octets).
- **On table sur une dérive relative** entre l'horloge d'émission et de réception qui permet de ne pas perdre la synchro bit.
- **Adapté à des débits faibles.**



Transmission plésiochrone

- **Les horloges émetteur et destinataire** ont des fréquences **différentes mais voisines** (dérive max tolérée liée au débit).
- **Le récepteur synchronise une horloge de réception sur l'horloge d'émission.** Exemple: usage d'un préambule qui est un signal d'horloge présent dans tout message.
- **Le message est ensuite échantillonné correctement** par le récepteur mais **il est limité en taille** selon les dérives relative des horloges tolérées.
- **Adaptation aux vitesses relatives** des horloges:

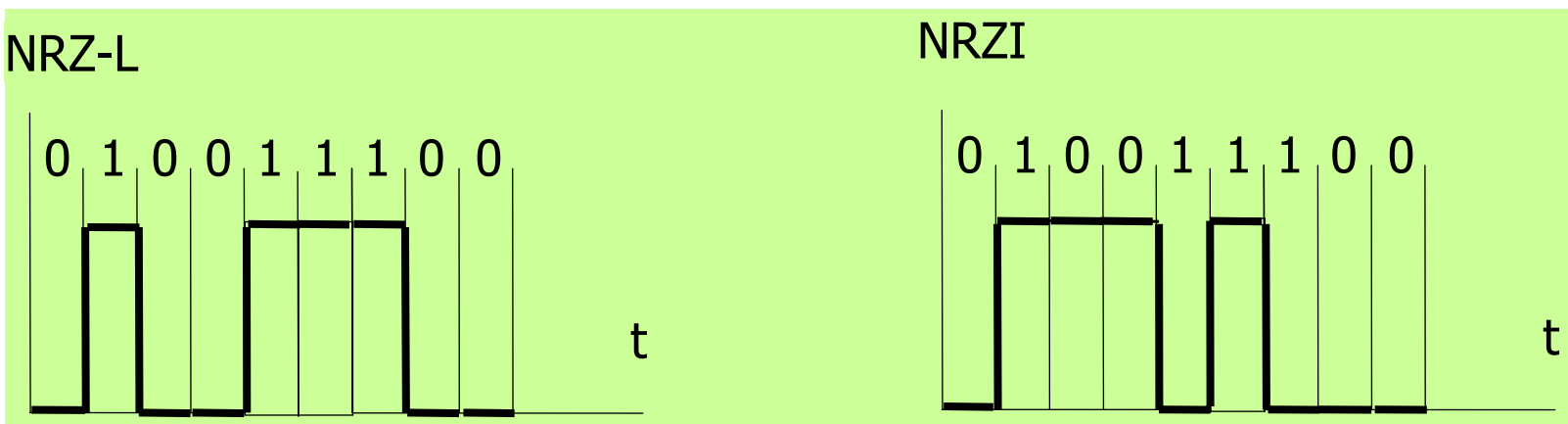
  => techniques de **justification.**
- **Détermination de la position** des informations significatives:

  => techniques de **pointeurs.**
- **Détails : PDH et SDH.**

Techniques de codage
Signaux bande de base en amplitude

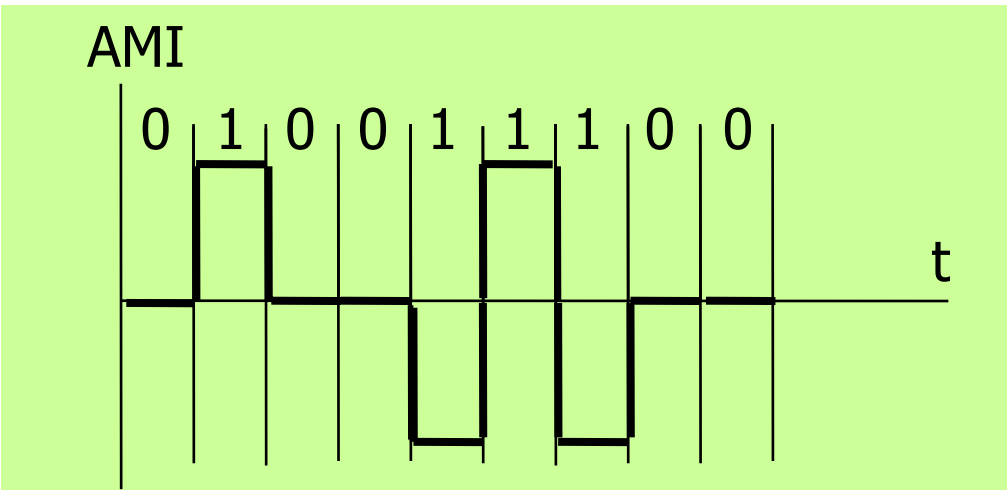
Codages NRZ "Non Retour à Zéro"

- **Le niveau est constant sur un intervalle (il n'y a pas de transition de retour à zéro)**
  - **NRZ-L** ("Level") On utilise deux niveaux pour coder le 0 et le 1. **Exemple: V24**.
  - **NRZI** ("Inverted") Codage différentiel des 1. Chaque nouveau 1 entraîne un changement de polarité par rapport au précédent 1 alors que le 0 n'entraîne pas de modification. **Exemple: Ethernet 100 sur fibre.**



Signaux bande de base en amplitude
Les codages AMI et pseudo ternaire

- **Trois niveaux : 0 , +V, -V volts (code bipolaire).**
- **Bipolaire AMI:** "Alternate Mark Inversion" Un 0 est représenté par le signal 0 volts et un 1 est représenté alternativement par +V et -V volts : Exemple: RNIS Bus d'abonné.



- **Pseudo ternaire :** On inverse le 0 et le 1 dans le schéma précédent.

Techniques d'embrouillage ("Scrambling")

- **Problème des codages NRZ ou AMI** : Absence de transitions dans de longues séquences de symboles identiques.
- **Solution =>** Utiliser un codage préliminaire qui permet de forcer l'apparition de transitions dans ces séquences.

Embrouillage par code polynomial

- **Technique employée dans un embrouilleur additif :** Ou exclusif avec une séquence pseudo aléatoire (0 et 1 aléatoires).
- **La séquence pseudo-aléatoire** peut-être obtenue comme le quotient d'une division répétée indéfiniment par un polynôme générateur (circuit LFSR Linear Feedback Shift Register).
- **Opération ou exclusif avec la même séquence** à l'arrivée.
- **Exemple: Réseau ATM** => Polynôme $X^{31} \oplus X^{28} \oplus 1$

Codages HDB3 et B8ZS

- **Codage** pour résoudre le problème des suites de 0 dans le code AMI.
- **On remplace des suites de 0 de taille fixe** (soit 4 soit 8 bits) sans transitions par des suites de longueur identique possédant des transitions.

B8 ZS "Bipolar with eight zero substitution"

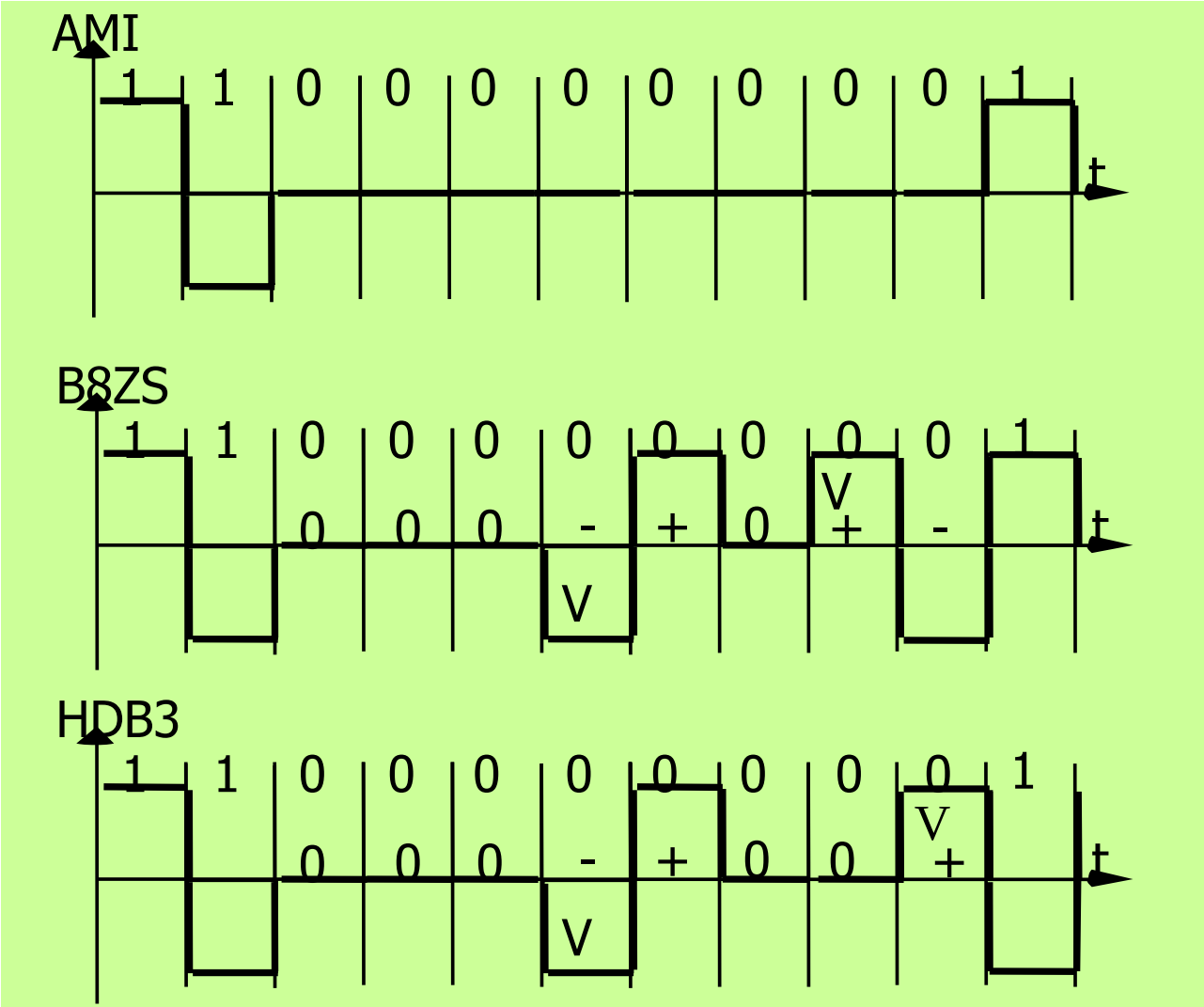
- Si la dernière excursion était positive (+) : 8 bits à 0 => 000+-0-+
- Si la dernière excursion était négative (-) : 8 bits à 0 => 000-+0+-
- **Utilisation: Réseau téléphonique RNIS américain.**

HDB3 "High Density Bipolar - three zero"

- 4 bits consécutifs à 0 sont remplacés selon la polarité de la dernière excursion et le nombre d'excursions depuis la dernière violation.
- **Utilisation : RNIS européen.**

Polarité précédente	Nombre d'excursions impair	Nombre d'excursions pair
-	000 -	+00+
+	000+	-00-

Exemples B8ZS et HDB3

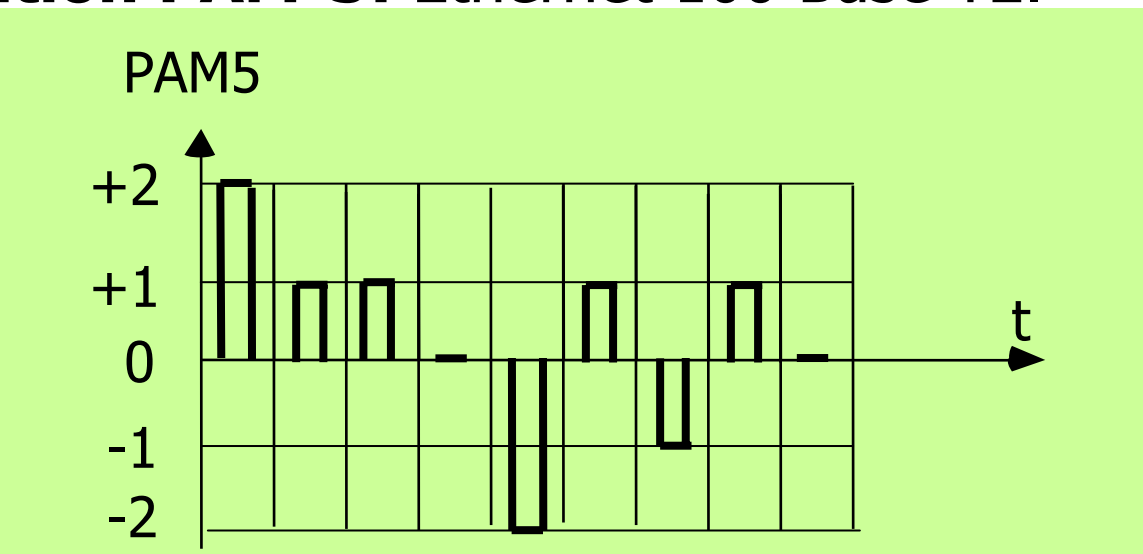


Codages nB/mB

- **On représente n bits à transmettre par m bits** (n<m).
- **On peut ainsi choisir des configurations** m bits qui présentent un bon équilibre de 0 et de 1 (un nombre suffisant de transitions).
- **Exemple: Ethernet 100 Mb/s** (et FDDI) Codage 4B/5B : 4 bits usagers sont transmis par des groupes de 5 bits.
  - On choisit des configurations binaires telles qu'il existe toujours au moins une transition par groupe de trois bits.
  - Les autres configurations sont utilisées pour la signalisation (délimiteurs de trames, acquittements en fin de trame...)
- **Autres exemples**: Réseau Ethernet Gigabit et FC ("Fiber Channel") Codage 8B/10B.

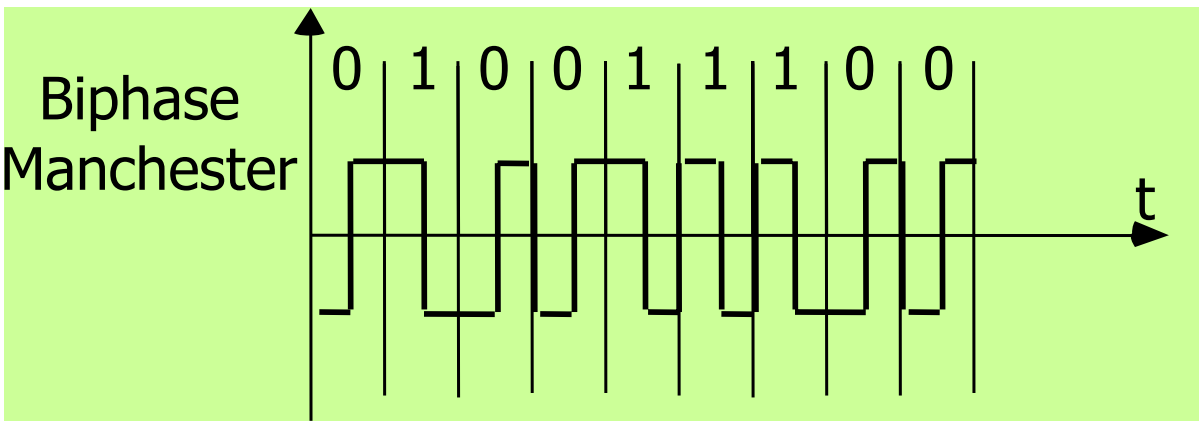
Signaux bande de base en amplitude
Modulation d'impulsion en amplitude

- **PAM** 'Pulse Amplitude Modulation'.
  - **Impulsions d'amplitudes différentes** (codages RZ avec retour à zéro) => transitions sur tous les bits.
  - **Exemple PAM-5 :** on utilise 5 impulsions (autres versions PAM-8 PAM-10 PAM-12 PAM-16).
  - **Utilisation PAM-5:** Ethernet 100 Base T2.



Signaux bande de base en phase
Code biphase (code Manchester)

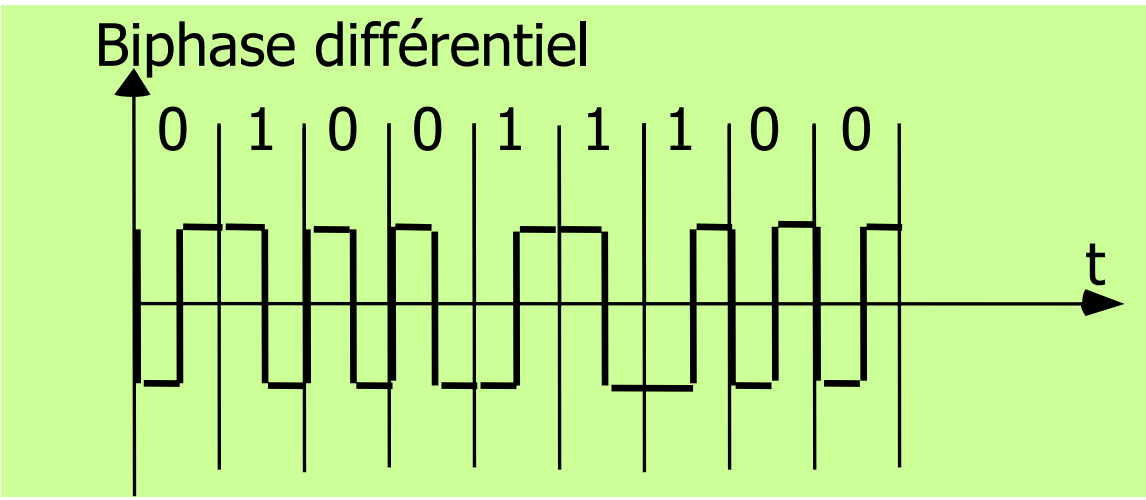
- **Utilisation de deux signaux d'horloge en opposition de phase.**
- **Le signal présente toujours une transition** au milieu de l'intervalle:
  - **Pour coder un 0** transition vers le haut.
  - **Pour coder un 1** transition vers le bas.



- **Exemple: Ethernet 10 Mb/s**.
- **Avantages:** Bonne occupation de la bande. Mise en œuvre très simple. Pas de composante continue (pas de problèmes sur les suites de symboles identiques). Transitions en milieu de période.
- **Inconvénients:** Nécessite une bande passante très large.

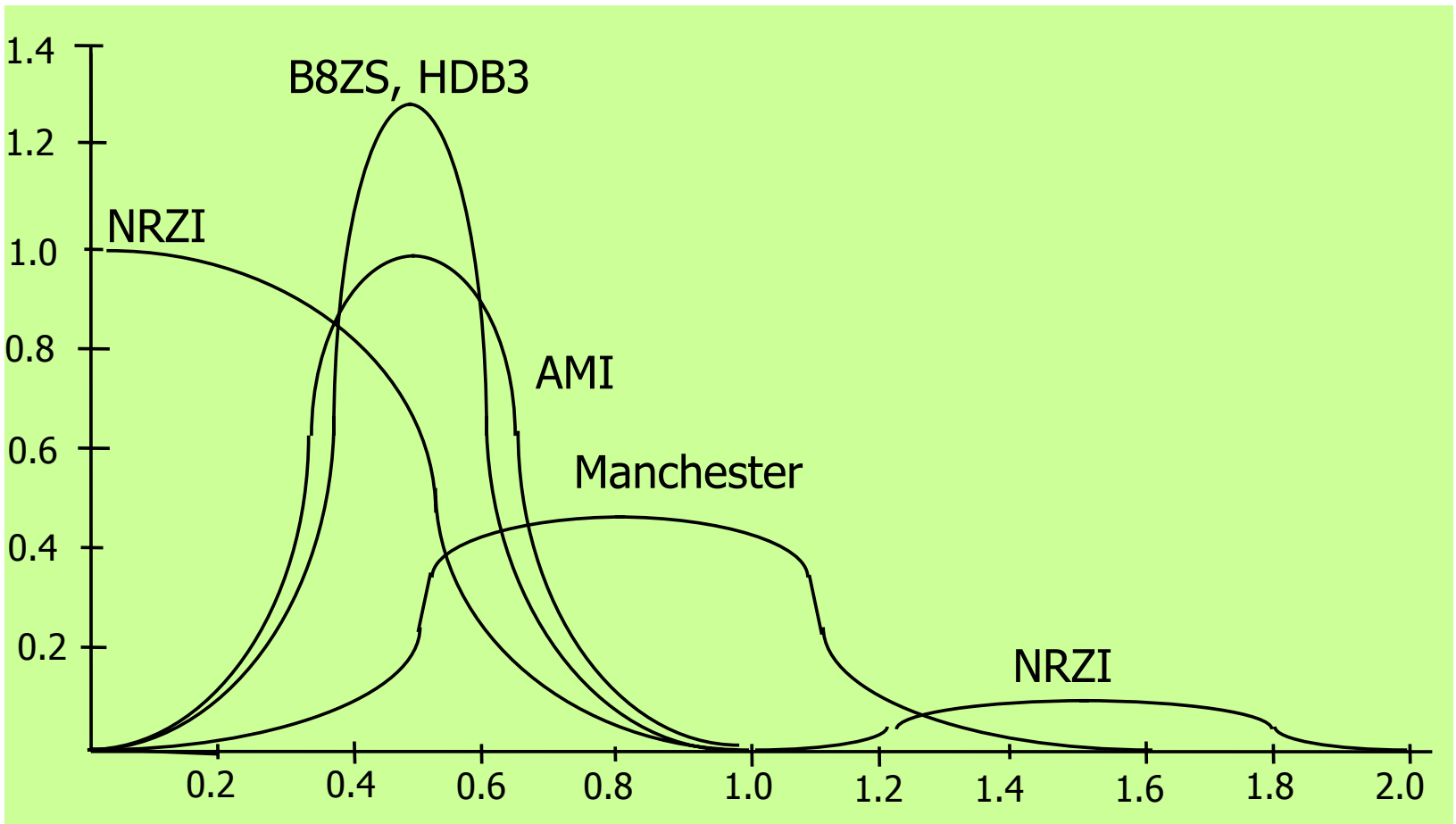
Signaux bande de base en phase
Code biphase différentiel

- **Codage en phase:** On a toujours deux signaux en opposition de phase.
- **Codage du 0 :** transition en début de période (le 0 provoque toujours un changement de signal => modulation différentielle).
- **Codage du 1 :** absence de transition (le 1 conserve le même signal).
- **Exemple: Boucle IBM IEEE 802.5.**
- **Avantages Inconvénients:** Voisins de ceux du code Manchester.



Comparaison des différentes techniques de codage

- Puissance par unité de bande passante de différents codages en fonction de la fréquence normalisée.



La transmission analogique Modulation d'onde porteuse

- **Limitation des bandes de fréquence disponibles**
  - Exemple : Téléphone 300 à 3400 Hertz.
- **Affaiblissement et déformation des signaux** dus aux caractéristiques des câbles, ou des voies hertziennes....
- **Modems :** Nécessité de dispositifs d'adaptation de la source au canal (modulation à l'émission / démodulation à la réception).
- **Terminologie UIT-CCITT** : les ETCD ('Équipement de terminaison de circuit de données').

Transmission en modulation
Principe général

- **Signal de base** : S(t)
- **Porteuse sinusoïdale** : $P(t)=A_o \sin(\omega_o t + \phi_o)$
- **Modulation d'onde porteuse** :

  On transforme S(t) en X(t) = f(S(t)) en introduisant l'information du signal de base dans l'une des composantes.
  - Amplitude A
  - Fréquence ω
  - Phase ϕ

Modulation d'amplitude, de fréquence, de phase

- **Modulation d'amplitude** : $X(t) = f(S(t)) = A(S(t) \sin(\omega_0 t + \phi_o)$
- Exemple de base: Utilisation de deux amplitudes

  Codage du 0 : $A1 \sin(\omega_0 t + \phi_0)$ Codage du 1 : $A2 \sin(\omega_0 t + \phi_0)$

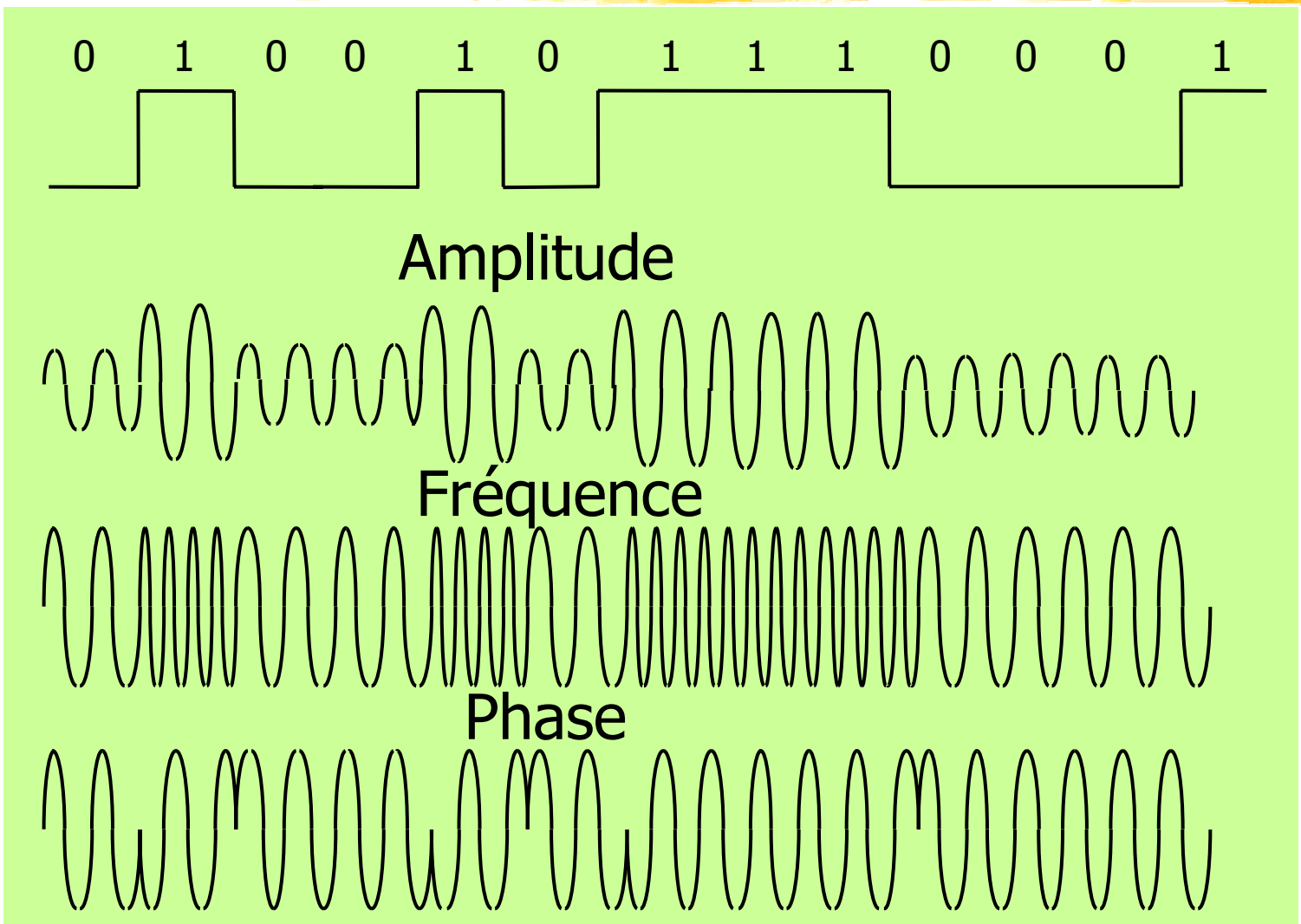
- **Modulation de fréquence** : $X(t) = f(S(t)) = Ao \sin(\omega(S(t)t + \phi_o)$
- Exemple de base: Utilisation de deux fréquences ω_1 et ω_2 .
- Modulation FSK "Frequency Shift keying"

  Codage du 0 : $Ao \sin(\omega_1 t + \phi_o)$ Codage du 1 : $A_o \sin(\omega_2 t + \phi_o)$

- **Modulation de phase** : $X(t) = f(S(t)) = Ao \sin(\omega_0 t + \phi(S(t))$
- Exemple de base: Utilisation de deux phases
- Modulation PSK "Phase Shift keying"

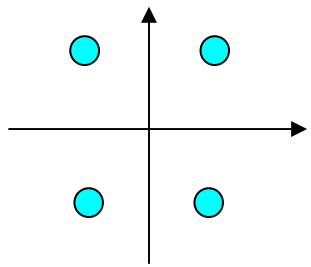
  Codage du 0 : $Ao \sin(\omega_0 t + \phi_1)$ Codage du 1 : $A_o \sin(\omega_0 t + \phi_2)$

Transmission en modulation
Exemples

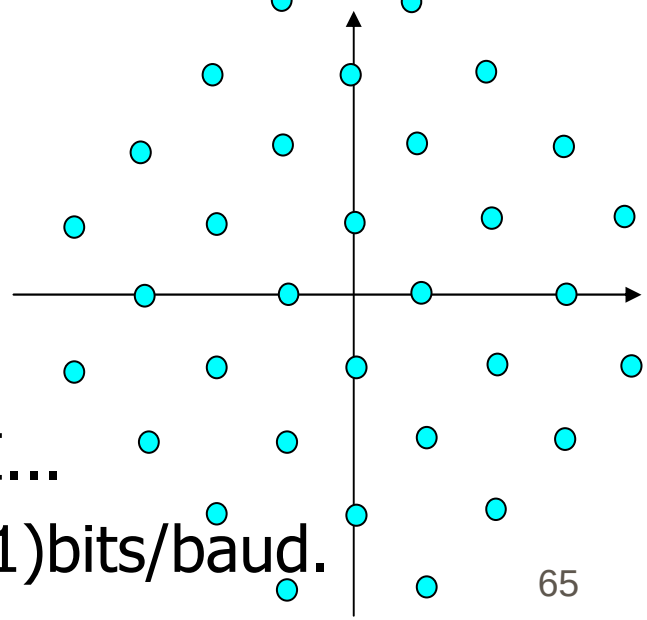


Modulations combinées d'amplitude et de phase

- **Exemple 1** : Modulation QPSK 'Quadrature Phase Shift Keying'.
  - Quatre signaux de phases différentes et de même amplitude.
  - **Utilisation** : Wifi.



- **Exemple 2** : QAM 'Quadrature Amplitude Modulation
  - Modulation d'amplitude et de phase.
  - Diagramme spatial ou constellation
  - **Utilisation:** nombreuses ADSL,WIFI...
  - **Exemple:** QAM-32 Modem V32 (4+1)bits/baud.

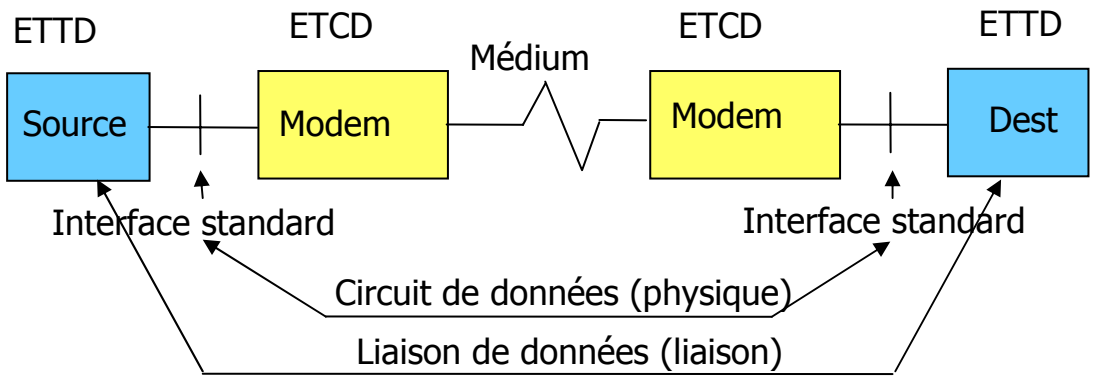


Niveau Physique

Seconde partie

Technologie du niveau physique

Introduction



- ETTD : Équipement terminal de traitement des données
- ETCD : Équipement de terminaison de circuit de données.

- **Différents éléments intervenant dans la transmission**
  - Contrôleur de communication.
  - Interface standard.
  - Modem.
  - Médium/Voie de communication.

Technologie du niveau Physique

Contrôleurs de communications (cartes réseaux)

Différentes fonctions d'un contrôleur (d'une carte réseau) (1)

- **Carte réseau = carte d'entrée/sortie**
  - **Dirigée** par des commandes d'entrées sorties
  - **Générant** des interruptions.
  - **Lecture/écriture** des informations en mémoire centrale (mode canal , DMA 'Direct Memory Access').
  - **Orientation principale**: communications séries.
- **Transmission en émission**
  - **Gestion des délimiteurs**.
  - **Emission données**: acquisition des mots mémoire, sérialisation, modulation.
  - **Génération** des codes détecteurs (ou correcteurs).

Différentes fonctions d'un contrôleur (d'une carte réseau) (2)

- **Transmission en réception**
  - Gestion des délimiteurs.
  - Désérialisation, écriture avec gestion de mémoire tampon (registres à décalages, ou mémoire locale carte).
  - Vérification des codes.
- **Gestion de l'accès au médium** (réseaux locaux).
- **Administration/configuration**
  - Adaptation aux différents débits
  - Adaptation aux différents modes:synchrone, asynchrone
  - Gestion du mot d'état (‘status word).
- **Logiciel système de pilotage : pilote (driver).**

Technologie du niveau Physique

Interfaces standards

Introduction aux interfaces standards

- **Notion d'interface standard:** L'ensemble des spécifications mécaniques et des utilisations des signaux électriques permettant une normalisation des interfaces de communication physique ETTD-ETCD.
- **Exemples:** (très très grande variété).
  - **Interfaces séries ITU/CCITT** V24/V28 RS232C; RS422/V11, RS423/V12 , V35, X21….
  - **Interface USB** (Universal Serial Bus).
  - **Interface Firewire** IEEE 1394.
  - ….
- **Autre besoin :** interfaces ETCD médium de communication.
  - **Interfaces téléphoniques** (pratiquement différentes dans tous les pays , RJ11)
  - ….

Exemple de l'interface V24

- **L'avis V24 du CCITT définit les spécifs fonctionnelles** de la jonction avec de nombreux modems bas débit.
- **L'avis V28 correspond aux caractéristiques électriques** des signaux de la jonction.
- **Spécifications V24/V28 (ITU), RS232C (EIA)** très voisines
- **Les protocoles sont codés** par des niveaux ouverts/fermés sur des signaux (nomenclature série 100) correspondant à des broches du connecteur DB25. Exemple: signal 125 broche 22.
- **Trois étapes principales**
  - Établissement / libération du circuit
  - Initialisation
  - Transmission

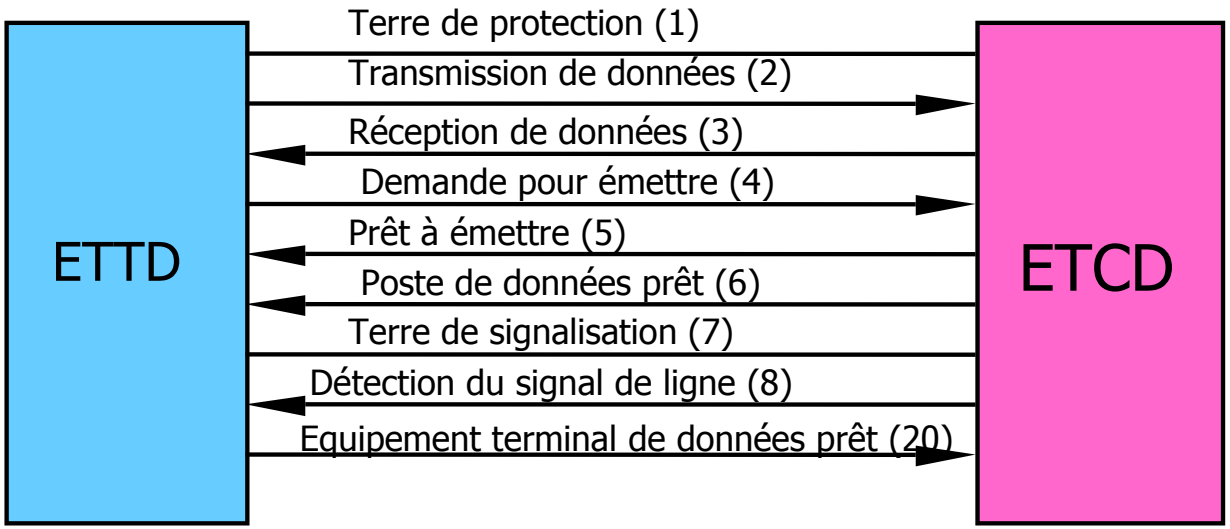
Interface V24 : Quelques signaux importants

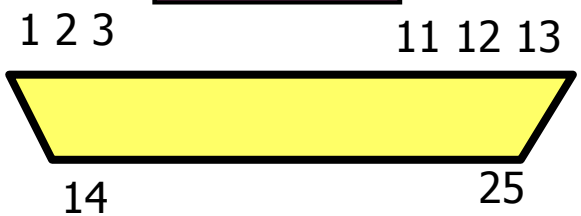
- **Établissement et libération du circuit**
  - 125 (22): Indication d'appel (coté modem), ETCD -> ETTD.

  (ex : sonnerie du téléphone)
  - 108 (20): Autorisation de connexion (du modem) ETTD->ETCD.
  - 107 (06): Acquittement (le modem est relié à la ligne) ETCD -> ETTD.
- **Initialisation**
  - 105 (04): Demande pour émettre ETTD-> ETCD
  - 106 (05): Prêt à émettre ETCD -> ETTD
  - 109 (08): Détection de porteuse ETCD -> ETTD
- **Transmission**
  - 103 (02): Données ETTD -> ETCD
  - 104 (03): Données ETCD -> ETTD
  - 113 (24): Horloge émission (générée par le terminal)

Interface V24 : Compléments

- **Représentation logique de l'interface**





- **Connecteur (mâle coté ETTD)**
- **Normes électriques V28**
  - (-3V) à (-25V) : 1 logique
  - (+4V) à (+25V) : 0 logique (on prend -5,+5 v)

Technologie du niveau Physique

Modems

Catégories de modems

- **Modulateurs/démodulateurs**
- **1) Modems téléphoniques** : utilisation du téléphone fixe sur paire téléphonique.
  - **Modems anciens (débits faibles)**
  - **Modems ADSL 'Asymmetric Digital Subscriber Line'**
- **2) Modems cables**
  - **HFC 'Hybrid Fiber Coaxial Cable'** : utilisation des câbles de télédistribution.

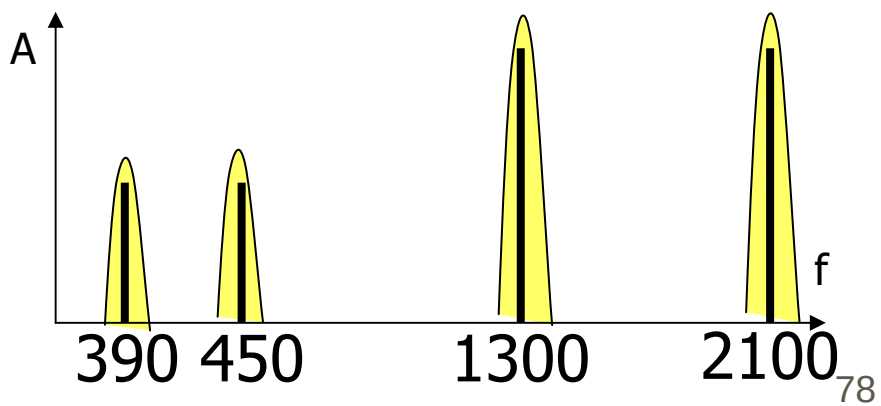
Modems anciens
Exemple : Avis V23

- **Débit** : 600/1200 bits/seconde (Modem du minitel)
- **Transmission** : asynchrone
- **Support utilisable** : Réseau commuté (2 fils) ou LS (4 fils)
- **Mode** : Duplex à l'alternat (ancien)

Duplex intégral : 600b/s ou 1200 b/s voie de retour 75b/s.

- **Principe** : modulation de fréquence pour les deux canaux

	Voie descendante	Voie de retour
1	2100 Hz	390 Hz
0	1300 Hz	450 Hz



Modems anciens
Exemple : Avis V32

- **Débit :** 2400,4800,9600 bits/seconde.
- **Transmission :** synchrone.
- **Support utilisable** : 2 fils ou Réseau Téléphonique Commuté.
- **Mode :** duplex intégral
- **Principe de modulation :** QAM 'Quadrature Amplitude Modulation)
- **Rapidité de modulation**: 2400 bauds ;

Valence: 32 => Le débit réel 12 000 b/s est supérieur au débit utile permettant l'utilisation d'un code correcteur implanté par le modem.

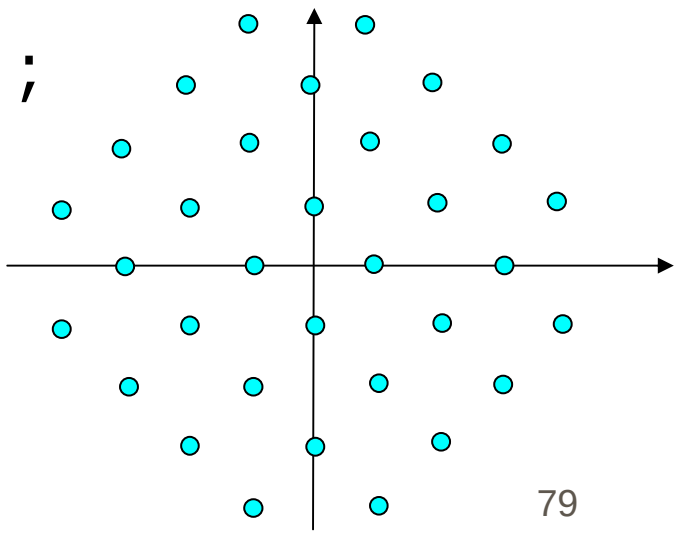


Tableau des normes de modems anciens

Avis	Mode	Débit	Modul	Support	Trans
V21	Async	300b/s	Fr	RTC-LS2	Dup
V22	Syn/Async	600-1200b/s	Ph	RTC-LS2	Dup
V22bis	Syn/Async	1200-2400b/s	Am Q	RTC-LS2	Dup
V23	Syn/Async	1200-75b/s	Fr	RTC-LS2	Dup
V26	Syn	2400b/s	Ph	LS4	Dup
V27	Syn	4800b/s	Ph-D	LS4	Dup
V29	Syn	9600-4800b/s	Ph+A	LS4	Dup
V32	Syn/Async	9600-4800b/s	Am Q	RTC-LS2	Dup
V32bis	Syn/Async	14400-4800b/s	Am Q	RTC-LS2	Dup
V33	Syn	14400-12000b/	Am Q	LS4	Dup
V34	Syn/Async	33600-2400b/s	Am Q	RTC-LS2	Dup

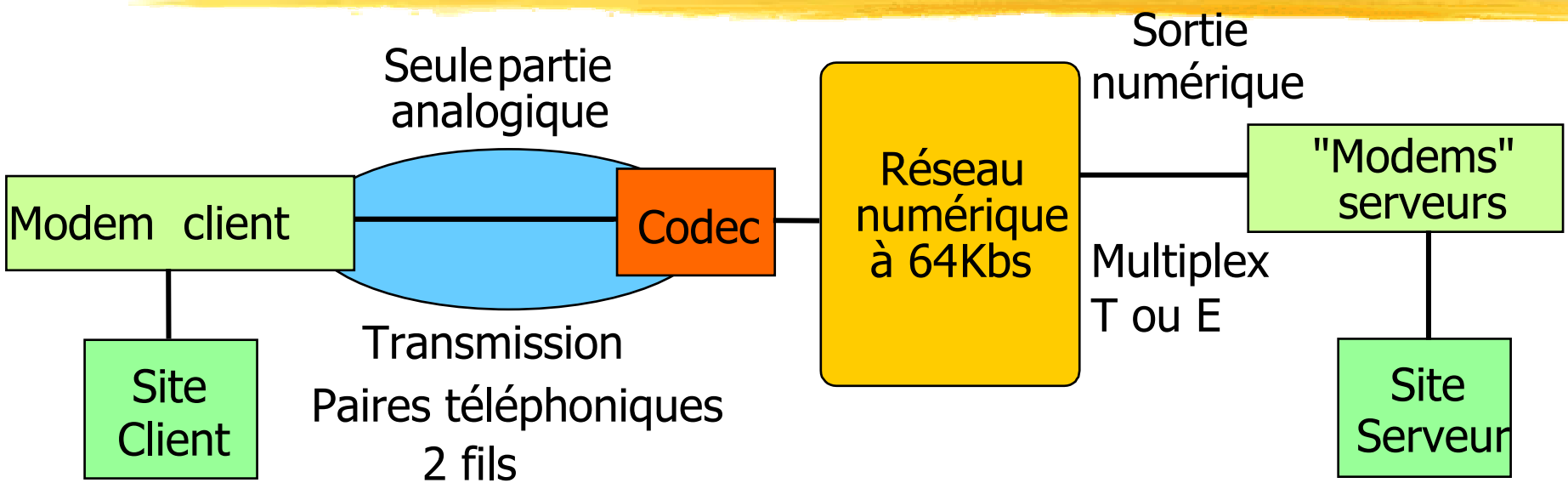
Explications

- Syn: Synchrone
- Async: Asynchrone
- Am Q : modulation d'amplitude et de phase (QAM).
- Ph : modulation de phase
- Fr : modulation de fréquence
- RTC : Réseau téléphonique commuté
- LS 2/4 : liaison spécialisée 2 ou 4 fils.
- Dup : mode bidirectionnel simultané

Le modem V90/V92 (56 Kb/s)

- **Rappel**
  - **Les modems traditionnels** considèrent le RTC (Réseau Téléphonique Commuté) comme **un réseau entièrement analogique**.
  - **Mais le RTC est pratiquement numérique** à 64Kb/s.
  - **Le téléphone numérisé MIC** avec un bruit de quantification des codecs de l'ordre de 36db offre un débit maximum théorique de l'ordre de 35 Kb/s
  - **D'ou la norme V34** constituant une limite pour l'approche analogique avec un débit de 33,6 Kb/s.

Principes d'une nouvelle génération de modems sur RTC



- **En fait le réseau téléphonique est numérisé à 64 Kb/s** sur toute son étendue (sauf le rattachement abonné).
- **Les serveurs d'accès peuvent être directement rattachés** au réseau numérique via des multiplexes PDH (T Etats-Unis ou E Europe).
- **La seule partie analogique est le rattachement usager** sur lequel le rapport signal à bruit permet un débit supérieur à 33,6 kbs.

La solution V90 (Rockwell , US Robotics)

- **Le modem V90 offre deux débits différents**
  - 33600 b/s sens client vers serveur (transmis en mode V34).
  - 56000 b/s sens serveur vers client (le plus intéressant à étudier)
- **A 56 kb/s le coté serveur** envoie des configurations numériques sur 8 bits vers le client.
  - **En fonction de la loi de quantification** le codec serveur génère des "symboles" analogiques
  - **Le modem client interprète la modulation reçue** (les signaux analogiques reçus) pour reconstituer les octets transmis.
- **Problème de mise en œuvre**:
  - **Le codec est conçu pour traiter des signaux de voix humaine** (les niveaux de quantification les plus faibles sont privilégiés) d'ou un problème de discrimination dans le domaine des autres niveaux.
  - **Utilisation d'une technique de codage** sur la partie analogique qui s'effectue avec perte de 8Kb/s ramenant le débit atteint à 56 Kb/s.

Conclusion Modem V90

- **Impossibilité de fonctionner à 56 Kb/s dans les deux sens:**
  - V90 : 34 Kb/s quand même => pas très grave car la voie descendante est souvent privilégiée par rapport à la voie montante.
  - Modem V92 voie montante à 48 Kb/s plus d'autres améliorations

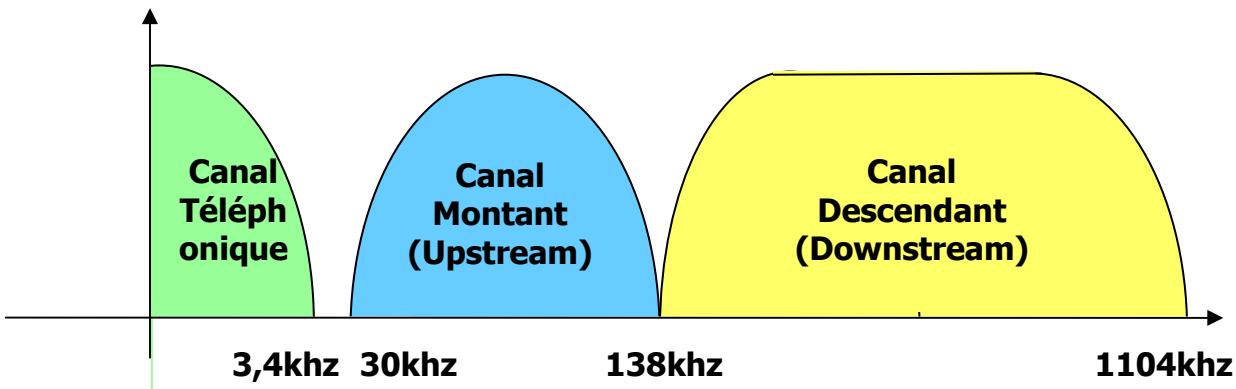
- **Pour que le débit 56 Kb/s fonctionne** il faut que le RTC soit entièrement **numérique MIC et selon la même loi de quantification.**
  - Pas de section analogique
  - Pas de conversion loi A en loi μ interne.
  - Pas de section avec codage non MIC (exemple pas de sections impliquant une conversion vers ADPCM)
  - Lors de l'établissement de la communication les modems opposés doivent tester s'ils peuvent effectivement fonctionner à 56 Kb/s sinon repli en V34 (ou moins encore).

Le modem ADSL ANSI T1.413, UIT G992 ('Asymmetric Digital Subscriber Line')

- **Idée principale :** Utilisation de la bande passante des paires téléphoniques de raccordement abonné/autocommutateur.
  - Exemple: 1,1Mhz sur moins de 3000 m.Pas utilisable au delà de 6000 m.
- **Solution fréquente :** Multiplexage fréquentiel de trois canaux.

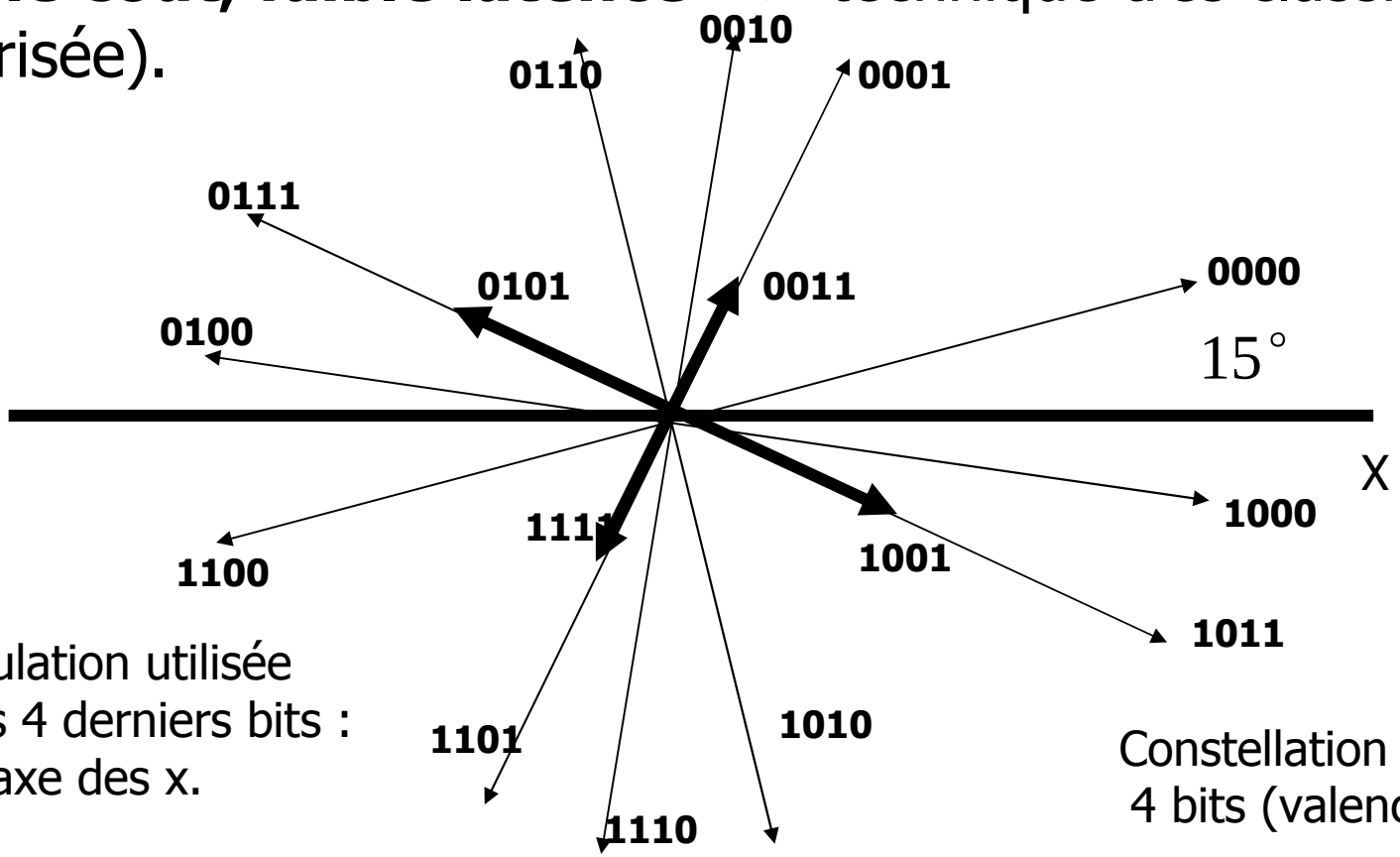
1) **Canal téléphonique** (3,4khz) : vers le réseau téléphonique classqiue.
2) **Canal numérique montant (upstream)** abonné -> central (max 1 Mb/s).
3) **Canal numérique descendant (downstream)** central -> abonné (max 8 Mb/s).

=> **Débits asymétriques dépendant de la qualité et de l'offre.**



Codage des voies numériques
1) CAP 'Carrierless Amplitude Phase'

- **Modulation d'amplitude et de phase** en s'adaptant en débit à la qualité de la bande disponible pour un canal numérique.
- **Faible coût, faible latence =>** technique très classique (bien maîtrisée).

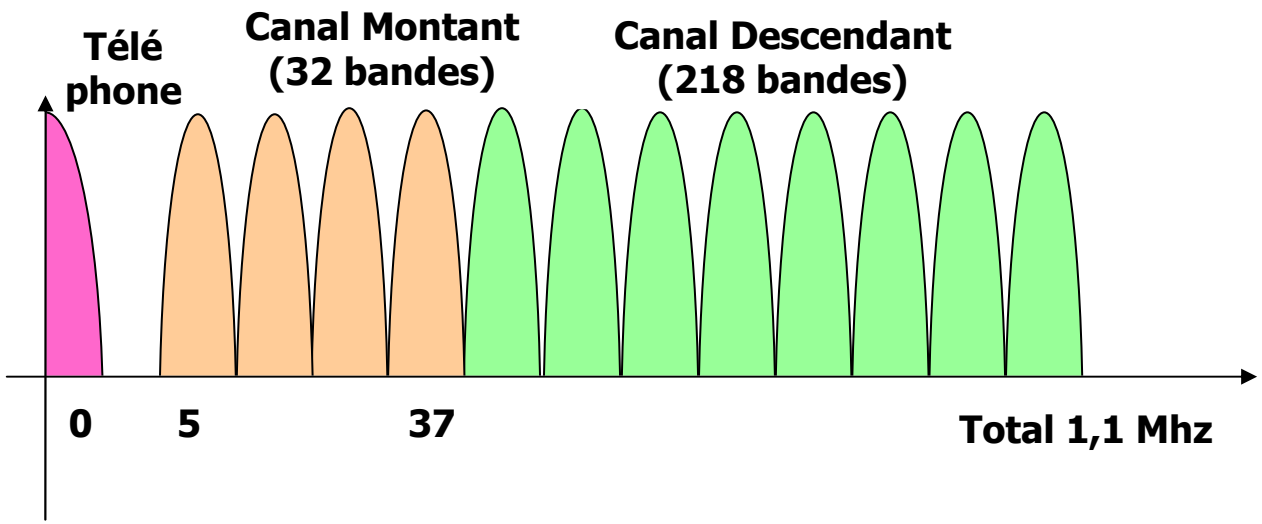


Modulation utilisée pour les 4 derniers bits : axe des x.

Constellation utilisée 4 bits (valence 16).

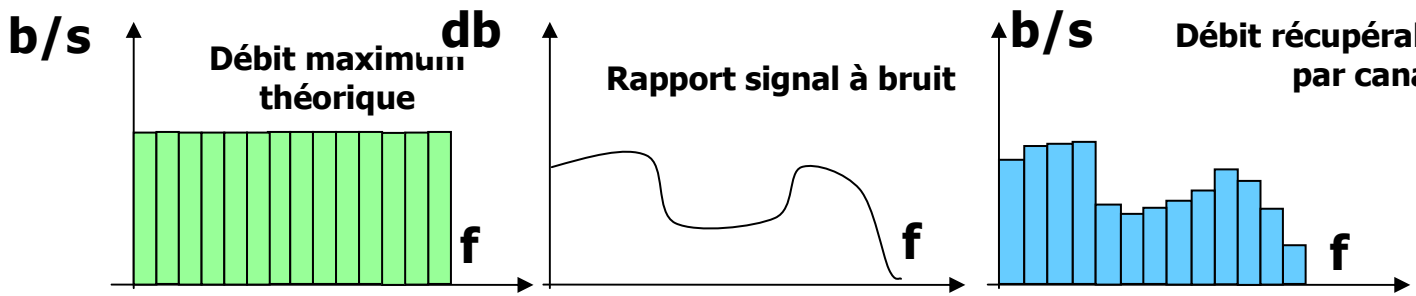
Codage des voies numériques
2) DMT 'Discrete MultiTone'

- **Technique plus fiable et plus sophistiquée, la plus élégante.**
- **Division du spectre en 256 canaux de 4 Khz** (exactement 4312,5 Hz) => Partage des canaux dépendant de l'opérateur.
- **Exemple de partage :** 1 canal téléphonique, 5 non utilisés, 32 flux montant et 218 flux descendant gérées indépendamment en modulation d'amplitude et de phase.



Technique de découverte adaptative du rapport signal à bruit (bande par bande).

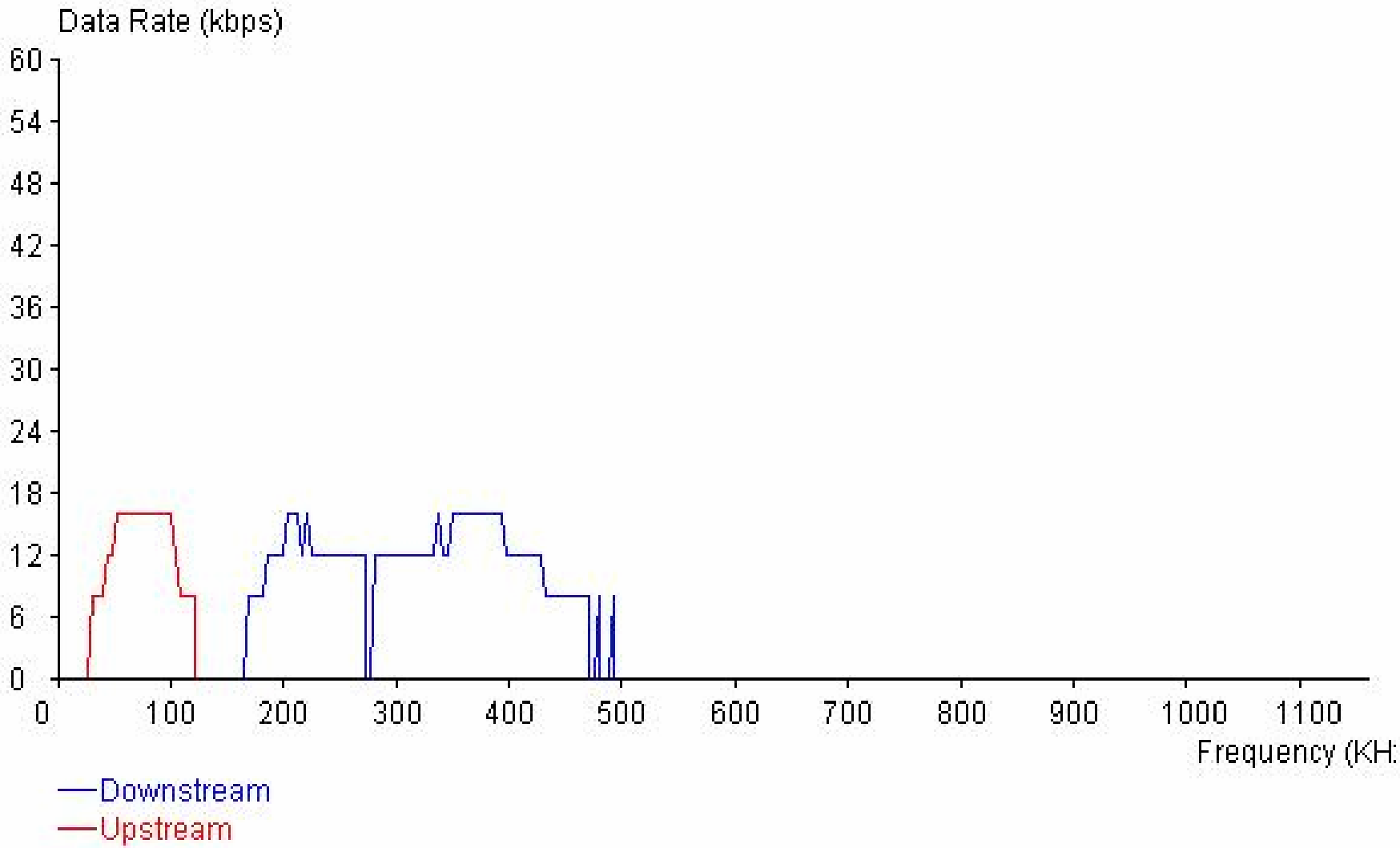
- **La qualité de la transmission n'est pas la même** : pour tous les abonnés, et dans chacun des 256 canaux (section de la paire torsadée, imperfections de la paire, longueur, …)
- **Débit théorique maximum par canal de 4khz 60 Kb/s** : soit pour le canal montant 1,5 Mb/s et pour le canal descendant 14,9 Mb/s.



- **Exemples de** performances du canal descendant.

Débit	Section	Distance
1,5 Mb/s	0,5 mm	5,5 Km
6,1 Mb/s	0,4 mm	2,7 Km

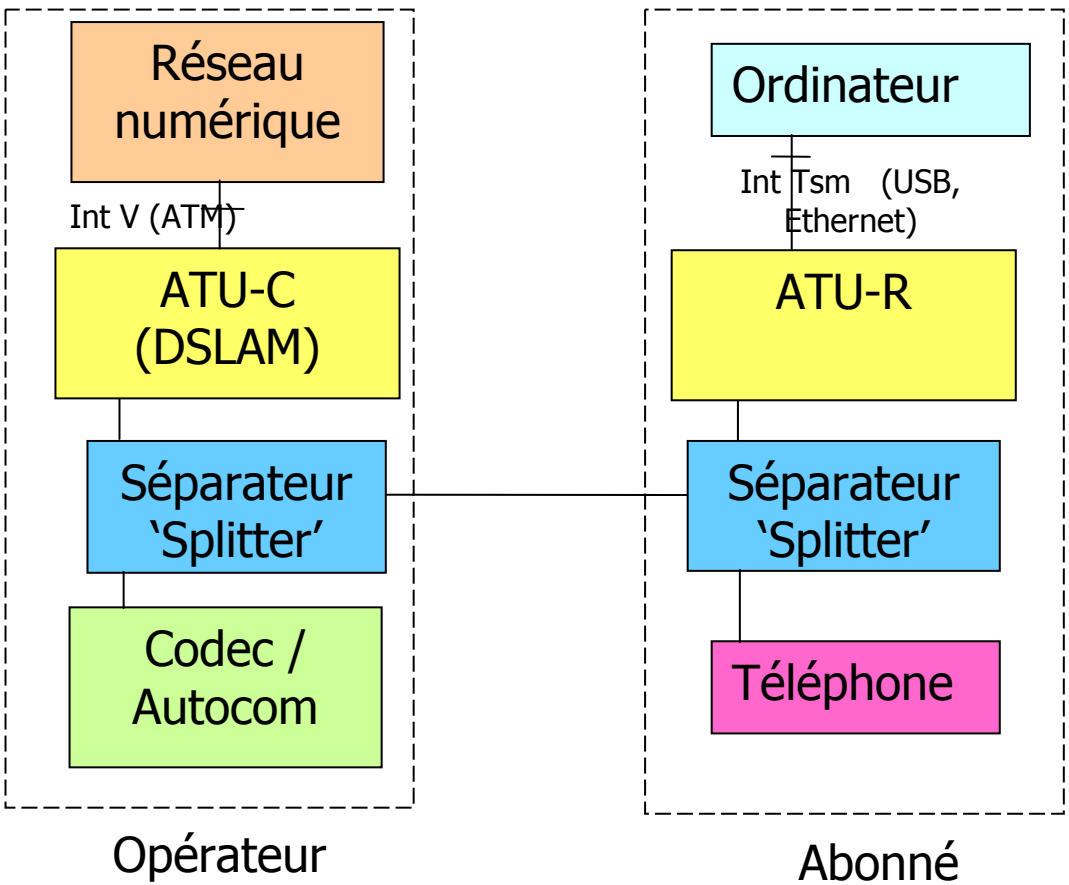
Un exemple de diagramme réel



ADSL: un ensemble complexe de techniques de transmission

- **Embrouillage** des signaux.
- **Correction automatique** d'erreur par code correcteur d'erreurs dans les trames (FEC Forward Error Correcting Code Reed-Solomon).
- **Codage QAM** pour chaque canal: rapidité de modulation 4000 baud, définition de la constellation utilisée permettant selon le rapport signal à bruit jusqu'à 15 bits par intervalle).
- **Tramage** : 68 trames ADSL sont regroupées dans une super trame.
- **Synchronisation** des trames.

ADSL: aspects architecturaux



- **ATU ADSL Transceiver Unit** (C Central, R Remote): l'essentiel du modem ADSL.
- **DSLAM Digital Subscriber Line Access Multiplexer** : multiplexeur d'accès ADSL chez l'opérateur
- **Interface V** : nom générique ADSL de l'interface avec le réseau numérique de l'opérateur (exemple un réseau ATM +IP)
- **Interface Tsm** : nom générique de l'interface entre le modem ADSL et l'ordinateur usager (branchement sur port USB ou sur port ethernet).

Technologie du niveau Physique

Voies de communications (média)

Introduction

- **Objectif du chapitre : apécifier les caractéristiques** des câblages utilisés couramment dans l'entreprise.
  - **Paires torsadées.**
  - **Fibres optiques.**
  - **Câbles coaxiaux.**

Les paires torsadées

- **Deux conducteurs en cuivre, isolés**.
- **Enroulés de façon hélicoïdale** autour de l'axe (l'enroulement permet de réduire les inductions électromagnétiques parasites de l'environnement).
- **Utilisation courante**
  - **Réseaux téléphoniques**.
  - **Réseaux locaux**.

Paires torsadées blindées STP "Shielded Twisted Pairs"

- **Fournies en câbles de 2 paires**.
- **Chaque paire est blindée.**
- **L'ensemble est également blindé**.
- **Possibilités importantes** -> 500 Mhz.
- **En fait différentes difficultés**.
  - **Plus coûteux à l'achat** et à **l'installation.**
  - **Assez encombrant.**
  - **Problèmes posés par les courants dans les blindages** lorsque les appareils reliés sont à des potentiels différents.
- **Exemple d'utilisation:** Boucle IBM avec le connecteur DB9 ou le connecteur IBM UDC "Universal Data Connector" Performances exploitées faibles en débit => 16 Mb/s.

Paires torsadées non blindées UTP "Unshielded Twisted Pairs"

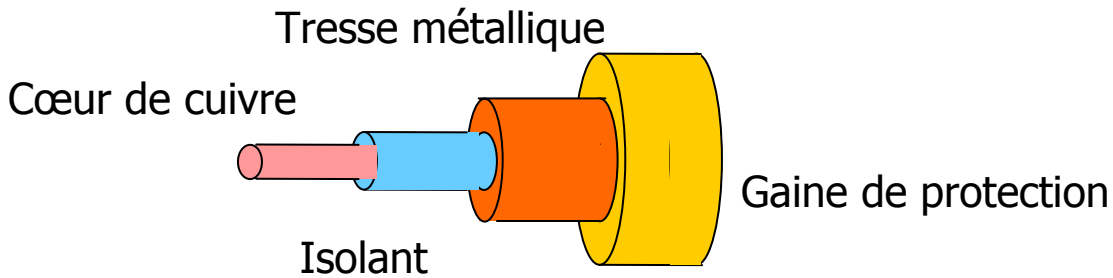
- **Fournies en câbles de 4 paires.**
- **Possibilités significatives** (en développement permanent).
- **Pour un coût raisonnable.**
- **Existence de différentes catégories** de paires UTP aux caractéristiques très normalisées (normes EIA 568):
  - **Impédanc**e caractéristique.
  - **Influence d'une paire sur l'autre** en db.
  - **Atténuatio**n (en db).

Les catégories EIA568B "Commercial BuildingTélécommunications"

- **Cat 1:** Anciennement recommandée pour le téléphone (actuellement non recommandée).
- **Cat 2**: Anciennement recommandée pour la boucle IBM 4Mb/s. (actuellement non reconnue).
- **Cat 3**: Recommandée pour les bandes de fréquences jusqu'à 16 MHz. Utilisation typique pour le réseau Ethernet 10 Mbit/s.
- **Cat 4**: Anciennement recommandée jusqu'à 20 MHz typiquement pour la boucle IBM 16 Mbit/s.
- **Cat 5**: Performance jusqu'à 100 MHz pour le réseau Ethernet à 100 Mbit/s (actuellement non recommandée).
- **Cat 5e**: Recommandée pour les performances jusqu'à 100 MHz pour Ethernet à 100 Mbit/s et Ethernet Gigabit.
- **Cat 6, 6A**: Performance jusqu'à 250 MHz (Ethernet Gigabit ou 10G).
- **Cat 7**: Performance jusqu'à 600 MHz (en fait quatre paires torsadées blindées STP). (Ethernet Gigabit ou 10G).

Câbles coaxiaux

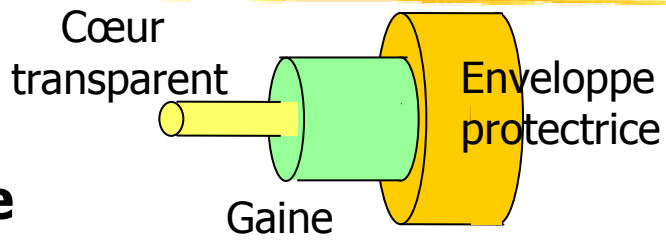
- **Deux conducteurs concentriques**: un **conducteur central** le coeur, un matériau **isolant** de forme cylindrique, une tresse concentrique **conductrice**:



- **Meilleures caractéristiques que les paires torsadées** (largeur de la bande passante et protection contre les rayonnements parasites).
- **Actuellement en perte de vitesse au profit des paires torsadées ou des fibres.**

Fibres optiques

- **Fibre optique = guide de lumière.**
  - **Un cœur transparent (plastique, verre)**
  - **Entouré d'une gaine puis une enveloppe**
  - **Le cœur a un indice de réfraction plus élevé que la gaine pour confiner la lumière**



- **Système de transmission à fibre : Trois composants**
  - **Conversion d'un signal électrique en signal optique** source de lumière : Diode **LED** "Light Emitting Diode" ou Diode laser.
  - **Fibre optique** : qui joue le rôle d'un guide d'ondes lumineuses.
  - **Détecteur de lumière** : photodiode de type **PIN** ("Positive Intrinsic Negative") ou à avalanche, qui restitue un signal électrique.
- **Différents types de fibre**
  - **Fibres à saut** d'indice, **à gradient** d'indice**, à cristaux photoniques**.
  - **Fibres multimodes, fibres monomodes**.

Avantages des fibres optiques

- **Bande passante très importante** (de l'ordre de 1 GHz/km => débit binaire très important).
- **Faible affaiblissement** de l'ordre de 0,25 dB/km.
- **Plusieurs dizaines de kilomètres** entre amplificateurs.
- **Peu sensible aux perturbations** électromagnétiques
- **Taux d'erreur très faibles**
- **Utilisation dans des environnements difficiles** (variation de température...).
- **Matière première bon marché**.
- **Légèreté et faible volume** qui permettent la pose de tronçons longs avec plusieurs fibres.
- **Possibilité de multiplexage en longueur d'onde** (WDM).

Problèmes des fibres optiques

- **Les raccordements** (épissures optiques) restent délicats à réaliser sur le terrain et introduisent un affaiblissement.
- **Les dérivations ne peuvent s'effectuer qu'au prix d'une perte de puissance importante** (limitation de l'utilisation de la fibre optique pour la diffusion).
- **Régénération, amplification et commutation** optique restent des sujets de recherche.

- **Malgré cela : Bande passante très importante, affaiblissement très bas,**

=> Les liaisons optiques sont très utilisées.

Technologie du niveau Physique

Réseaux au niveau physique

Exemple du réseau téléphonique commuté et des réseaux PDH, SDH

Introduction à la transmission téléphonique numérique

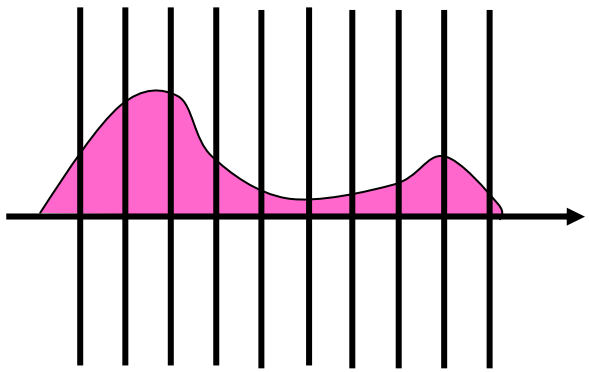
- **La transmission numérique offre des performances supérieures à la transmission analogique:**
  - **Faible taux d'erreur** des liaisons numériques. Les répéteurs numériques, régénérateurs de signaux, ... ne connaissent pas les inconvénients des amplificateurs utilisés par les supports analogiques.
  - **Les informations de type voix, images et données, représentées sous forme numérique peuvent facilement être multiplexées** sur un même support de transmission.
- **Utilisation de la numérisation dans le Réseau Téléphonique Commuté** => RNIS Réseau Numérique à Intégration de Services (bande étroite):
  - **Canaux de communication B à 64 Kb/s**

MIC Modulation d'Impulsion Codée PCM "Pulse code modulation"

- **Une technique pour la transmission** du son sans compression utilisée par le téléphone (également disques compacts audio, fichiers sons…).
- **Le MIC se définit par trois caractéristiques principales :**
  - **Echantillonnage.**
  - **Quantification.**
  - **Codage.**
- **Notion de codec** (codeur/décodeur): convertisseur d'un signal analogique sonore en signal numérique et inversement.

MIC Echantillonnage

- **Echantillonnage : le processus de choix** des instants de prise de mesure sur un signal continu (par exemple: la voix parlée).

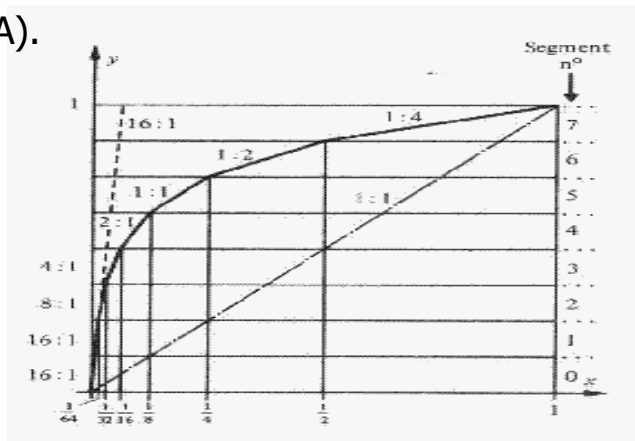


- **Bande passante visée** : B=4000 Hz.
- **Fréquence d'échantillonnage Nyquist :** R = 2B = 8000 échantillons/s
- **Période :** 1 échantillon/125µs)
- **Échantillons sur 8 bits** => Débit binaire 64 Kb/s.

MIC Quantification

- **Quantification :**
  - **le processus de conversion** d'une mesure d'un signal continu en une valeur numériques entière.
  - **L'amplitude entre deux valeurs** voisines définit la précision.
  - **L'erreur qui résulte du processus de quantification** est appelé le **bruit de quantification.**
- **Établissement de la correspondance effective**
  - Mesure du signal analogique sur 13 bits en Europe (14 bits aux USA).
  - Fourniture d'un nombre sur 8 bits
  - Le plus simple serait une correspondance linéaire:
  - En fait on utilise une courbe semi-logarithmique

garantissant une précision relative constante
(les petites valeurs sont quantifiés avec 16 fois
plus de précision que les grandes).



- **En Europe** : Loi A. **Aux USA,Japon** : Loi Mu.

MIC Codage

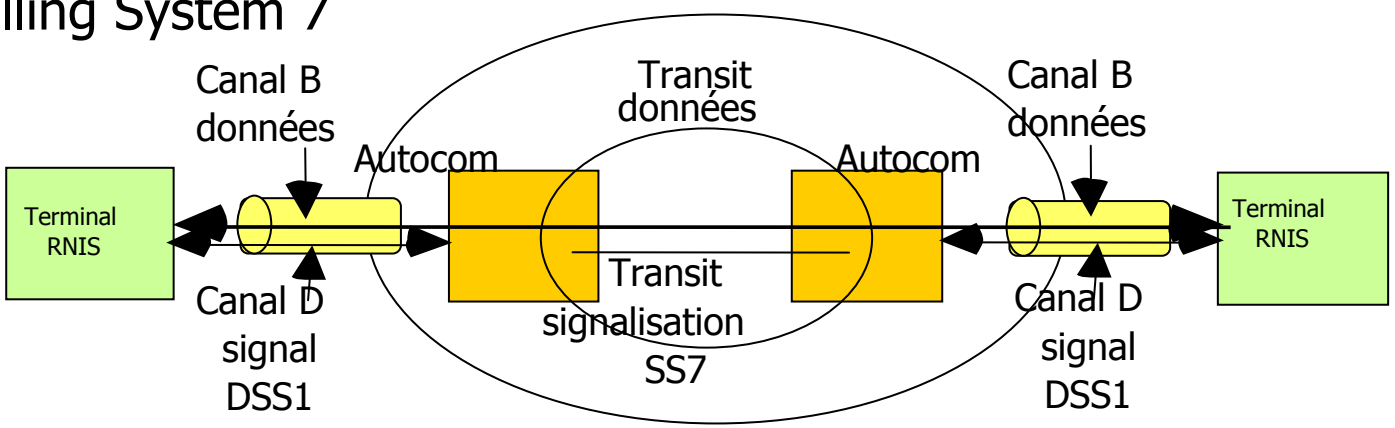
- **Codage:** Étape finale de représentation numérique des octets => Utilisation d'un codage de la valeur numérique quantifiée.
- **En Europe:** méthode ADI "Alternate Digital Inversion"
  - 1 bit sur 2 inversé : 0000 -> 0101
- **Aux USA** : méthode ISC "Inverse Symmetrical Coding"
  - Inversion par groupes de deux bits : 0011 -> 1100.

Autres procédés de codage numérique de la voix

- **Techniques de compression** pour un codage limitant la bande passante utilisée => propriétés de la voix humaine.
- **Modulation MIC différentielle (DPCM "Differential Pulse code modulation")**
  - **On code la différence** entre la valeur courante et la valeur précédente
  - **Exemple DPCM** : Si des écarts entre échantillons de ± 16 incréments, ou plus, sont très peu probables alors un codage sur 5 bits est suffisant.
  - **Lorsque l'écart est supérieur** à ± 16 incréments de quantification l'encodage utilise plusieurs échantillons pour rétablir la situation.
- **Modulation DELTA**
  - **On code sur un seul bit** chaque échantillon en indiquant s'il est plus grand ou plus petit que le précédent de une unité.
  - **Problèmes de rétablissement en cas de variations rapides.**

Réseau téléphonique : Fonctions de signalisation

- **Sur tout réseau téléphonique, nombreuses fonctions** de **signalisation indispensables d'accès au réseau** et d'administration (exemple : l'usager décroche, compose un numéro, le prestataire taxe ...)
- **Réseau téléphonique ancien:** signalisation dans la bande => problèmes.
- **Réseau téléphonique numérique**: un réseau numérique de signalisation (hors bande) utilise un protocole 'système de signalisation n°7) SS7 Signalling System 7

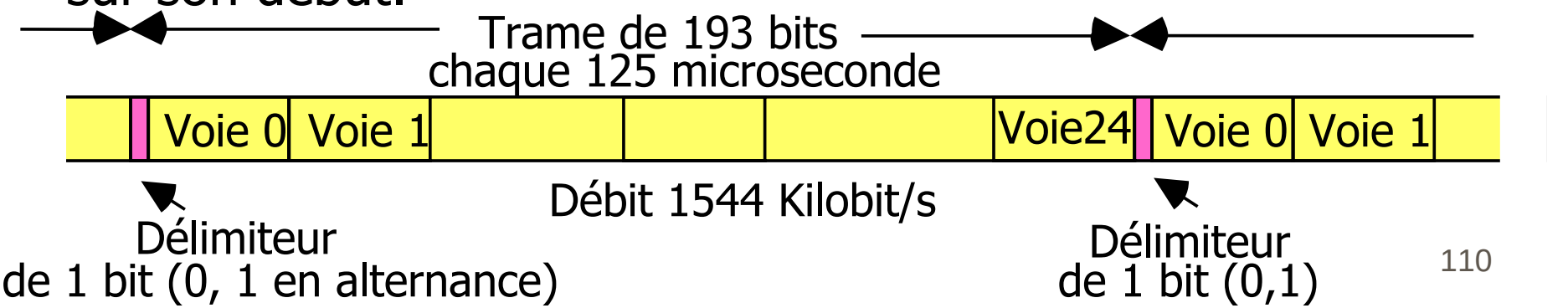


Les hiérarchies de multiplexage dans les réseaux téléphoniques

- **Nécessité du multiplexage** : pour optimiser les supports
  - Transport des circuits téléphoniques en multiplexage de circuits basse vitesse 64 Kb/s sur des voies haut débit.
  - Un échantillon chaque 125 micro secondes => Trames de n échantillons répétées chaque 125 micro secondes.
- **Rappel:** deux grandes classes de techniques de multiplexage
  - **Multiplexage par Répartition de Fréquence** (MRF ou FDM "Frequency Division Multiplexing") une bande de fréquence à chaque signal transporté => Solution ancienne
  - **Multiplexage à Répartition dans le Temps MRT** ("TDM Time Division Multiplexing") une tranche de temps à chaque signal transporté.
- **Les deux approches** industrielles de multiplexage temporel.
  - **PDH Plesiochronous Digital Hierarchy**
  - **SDH Synchronous Digital Hierarchy**

Problèmes posés par la transmission à haut débit en continu: Verrouillage

- **Détermination de l'emplacement des informations significatives**
  - **Les infos multiplexées sont "tramées":** assemblées dans des trames de taille fixe les trames sont émises en continu.
  - **Exemple du multiplex T1** pour 24 voies téléphoniques MIC (États-Unis)=> Il faut pouvoir retrouver les trames en réception en présence de multiples aléas de transmission (bruits, désynchronisations ...).
- **Notion de "verrouillage de trame"**: Une trame est dite "verrouillée" pour le récepteur s'il est correctement synchronisé sur son début.

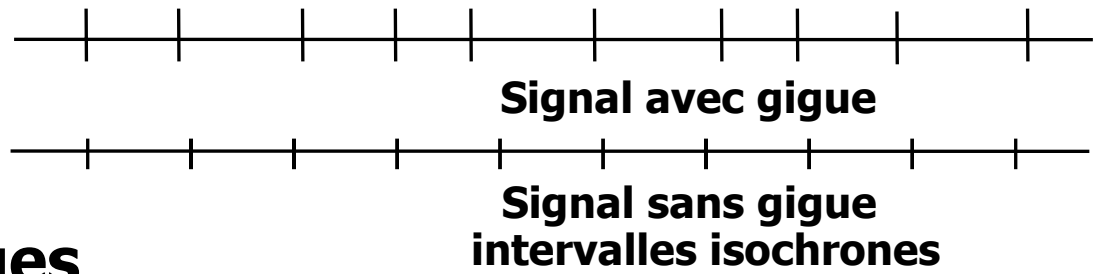


Problèmes de synchronisation d'horloges

- **Différences de fabrication => Différences de fréquence**
  - Les informations sont générées avec des horloges qui ne peuvent générer de manière parfaites des fréquences identiques.
  - Définition de tolérances sur les
- **Dérive d'horloges ("Wander")**
  - La fréquence d'une horloge dépend de la température et peut donc subir des dérives lentes (à l'échelle de plusieurs heures ou même plus) autour d'un valeur moyenne.
  - La variation en fréquence d'une horloge par rapport à une autre doit être bornée
  - Exemple: une horloge pour générer le multiplex PDH à 2,048 Mb/s doit-être à plus ou moins 5 10^{-5} ou encore + - 50 ppm (parties par million).

Problèmes de synchronisation d'horloges

- **Gigue ("Jitter")**
  - La fréquence d'un signal peut présenter des variations instantanées (autour d'une fréquence moyenne) lorsque des retards différents sont introduits dans le traitement des signaux.



- **Déphasages**
  - Les signaux issus de lignes différentes présentent des retards de propagation liées à la distance.

  => Déphasages entre les signaux.

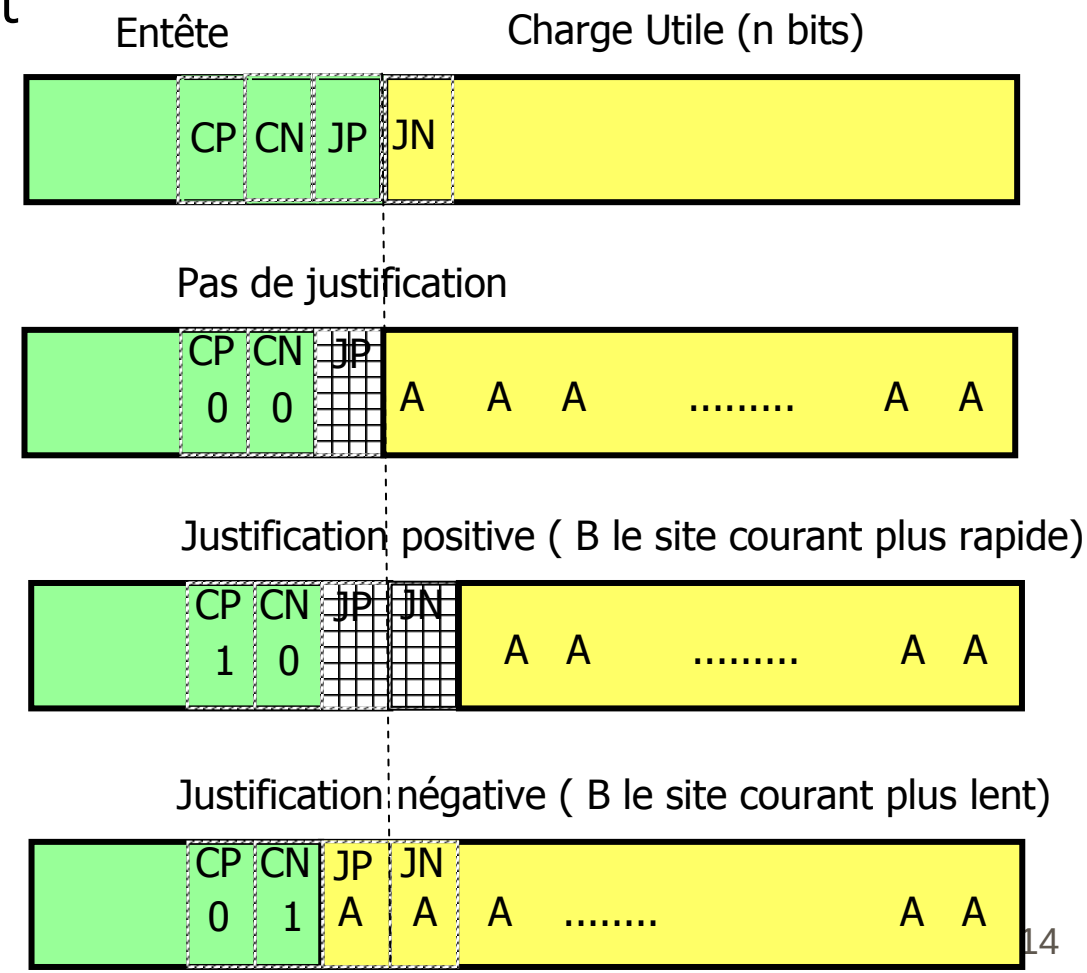
- **Débits**
  - Les différents appareils intervenant dans une chaîne de transmission ne traitent pas exactement les informations à la même vitesse.

Solutions de synchronisation d'horloges: techniques de justification

- **Justification Positive, Nulle ou Négative**
- Deux sites reliés par une voie haut débit:
- Les horloges de A et B sont **identiques** => Justification **nulle**
  - **Pas de justification**: on réémet le **même nombre** de bits
- L'horloge de A est plus rapide que celle de B => Justification **négative**
  - Pour un nombre de bits donné arrivant en B de A, on doit en renvoyer **plus**.
- L'horloge de A est plus lente que celle de B => Justification **positive**
  - Pour un nombre de bits donné arrivant en B de A on doit en renvoyer **moins**.

Fonctionnement de la justification

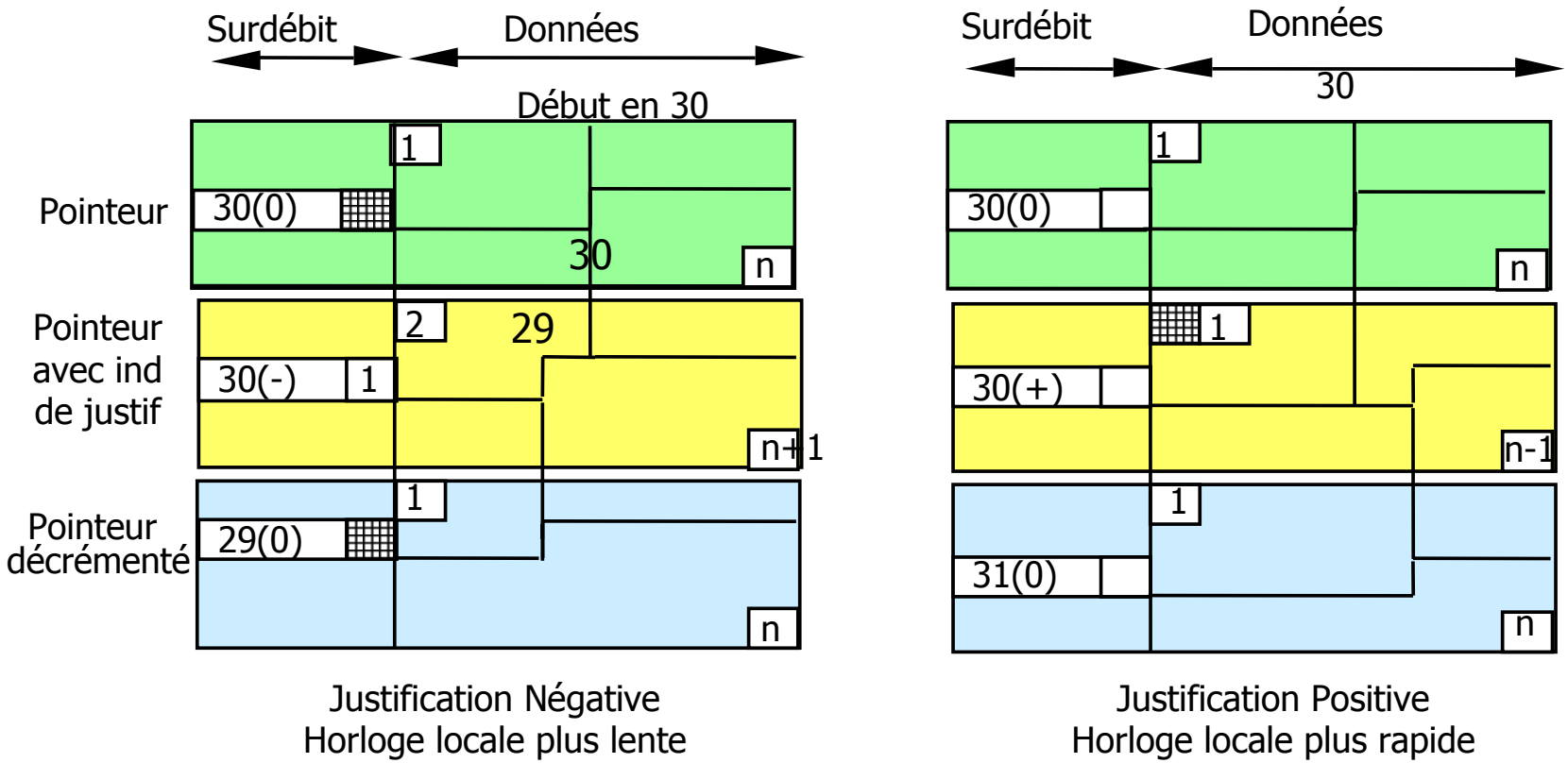
- **Présentation de la justification dans le cas d'un seul bit** : on ajoute ou l'on retranche un seul bit par trame.
  - **CP:** bit de contrôle de justification positive
  - **CN:** bit de contrôle de justification négative
  - **JP:** bit de justification positive
  - **JN:** bit de justification négative



Utilisation des pointeurs

- **Situation du problème :**
  - Quand des trames successives sont soumises à des justifications **successives de même sens**
  - => **Les délimitations entre les zones transportées** glissent à l'intérieur des conteneurs de charge utile
- **Utilisation de pointeurs.**
  - **Un pointeur est associé à la charge utile** de la trame.
  - **Sa valeur ne change pas** tant que la position relative de cette charge utile dans la trame ne varie pas.
  - **Le début des informations** significatives peut avancer ou être retardé par rapport à la valeur initiale => Modification du pointeur
  - **La charge utile peut "flotter"** dans l'espace alloué dans les trames.
  - **Pointeur placé dans une entête protocolaire** : **le surdébit**.
  - **Permettant d'accéder aisément** (indirection) aux infos transportées.

Fonctionnement des pointeurs en SDH



- **Remarque:** Présentation comme en SDH, la justification porte sur des octets et les trames ont une représentation matricielle.
- **On montre trois trames** successives dans les deux cas de justification.

Explications fonctionnement des pointeurs

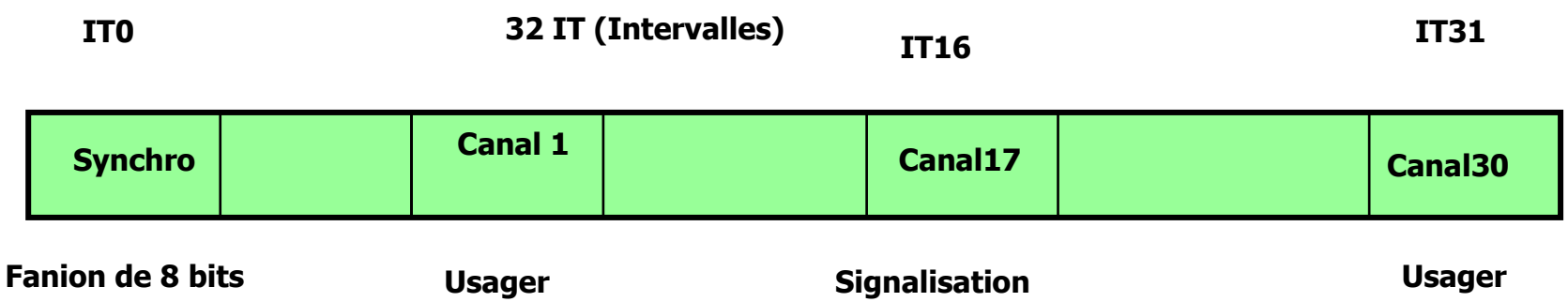
- **Si l'horloge locale a une fréquence plus faible** que celle du site d'origine du signal transporté:
  - On associe au pointeur une **indication de justification négative (-)**.
  - **Un octet de donnée est retranché vers le surdébit**.
  - **Dans la trame suivante** la valeur du pointeur est diminuée de 1.
- **Si l'horloge locale a une fréquence plus élevée**
  - On associe au pointeur une **indication de justification positive (+).**
  - **Un octet de bourrage est inséré** dans la charge utile.
  - **Dans la trame suivante** le pointeur est augmenté de 1.

PDH "Plesiochronous Digital Hierarchy"

- **Hiérarchie numérique plésiochrone :** solution maintenant un peu ancienne.
- **Solution de niveau physique et liaison :**
  - Modulation, synchronisation bit et trame en présence de délais de propagations et décalages d'horloge (techniques de justification).
  - Réalisant le multiplexage temporel de voies téléphoniques MIC (64kb/s).
- **Exemple de normes et de débits :**

Trame	Débit	Nb circuits	Avis CCITT
TN1 – E1	2 048 Kb/s	30	G.704, G.706
TN2 – E2	8 448 Kb/s	120	G.741, G.742
TN3 – E3	34 368 Kb/s	480	G.751
TN4 – E4	139264 Kb/s	1920	G.751

Exemple PDH : le multiplex E1 à 2 048 Kb/s G704 (TN1)



- **Surdébit:**
  - Nécessaire au maintien et à la récupération du synchronisme: l'IT0 acheminé dans le premier octet entête.
  - Utilisé en version multitrame il offre des possibilités de transmission d'informations multiples et complexes.
- **Débit utile:** on a 30 voies téléphoniques MIC et une voie IT16 permettant l'acheminement de la signalisation pour les 30 voies.

G704
Utilisation du surdébit (IT0)

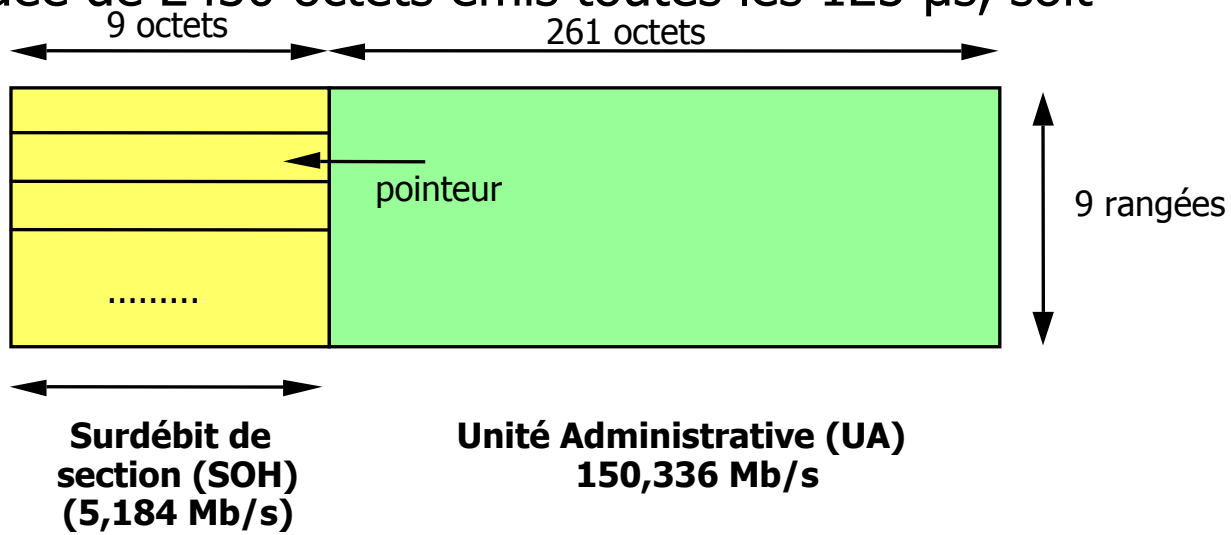
- **En regroupant 16 trames** (multi-trame) on dispose de 128 bits chaque 2 millisecondes utilisés pour de nombreuses fonctions:
  - **Une zone de verrouillage de trame** pour définir le début des trames (la synchronisation trame).
  - **Une zone pour la justification bit**.
  - **Une zone pour des signaux d'alarme** (en cas de mauvais fonctionnement).
  - **Une zone de contrôle de qualité : CRC-4**.
  - **Des zones libres d'usage spécifiques** (par exemple à caractère national).

Introduction aux réseaux SDH Synchronous Digital Hierarchy

- **Problèmes de la hiérarchie PDH**
  - **Manque de flexibilité** de la hiérarchie plésiochrone: pour accéder à une donnée dans un multiplex il faut démultiplexer tous les niveaux.
  - **Développement à partir de 1980** d'une nouvelle technologie:
  - **SONET Synchronous Optical Network** (Bellcore) **=> SDH.**
- **Originalité synchrone :** tous les noeuds d'un réseau utilisant la hiérarchie numérique synchrone sont **synchronisés**
  - Horloges de référence d'une précision spécifiée à **10-11.**
  - On a encore des dérives sensibles (utilisation à très haut débit).
- **Originalité pointeurs :** la technique **des pointeurs**
  - Permet de compenser les problèmes de variation de fréquence du signal
  - Mais aussi d'accéder directement aux données à l'intérieur des trames par des mécanismes d'indexation simples ...

Exemple STM-1 "Synchronous Transport Module 1"

- **Multiplex primaire de la hiérarchie SDH**
- **Trame de base** constituée de 2430 octets émis toutes les 125 µs, soit 155,520 Mb/s.
- **Organisée** en 9 rangées de 270 octets.



- **Dans une trame STM-1**, les informations sont placées dans des conteneurs qui peuvent être vus comme une structure hiérarchisée de groupage.
  - Le conteneur + son surdébit forment un conteneur virtuel (VCn).
  - STM1 -> Un conteneur VC4 ou plusieurs conteneurs plus petits: VC-1 (1,544 à 2, 048 Mb/s), VC-3 (34,368 à 44,736 Mb/s).

Conclusion SDH

- **Utilisation de SDH très importante et très variée**
  - Pratiquement toutes les Transmissions à longue distance.
  - Réseaux téléphoniques (RTC et mobiles)
  - Transport de cellules ATM, de paquets IP (IP sur SDH).
  - Niveau physique pour Ethernet 10 Gigabits/s.

Trame	Débit
STM-1 (OC3)	155,520 Mb/s
STM-4 (OC12)	622,080 Mb/s
STM-16 (OC48)	2488,320 Mb/s
STM-64 (OC192)	9953,280 Mb/s
STM-128 (OC384)	20 Gb/s
STM-256 (OC768)	40 Gb/s

- **Construction d'architectures de réseaux SDH**
  - Avec des répartiteurs, des brasseurs, des multiplexeurs.
  - Topologie en boucle SDH privilégiée.
- **La hiérarchie SDH est encore en développement.**