Réseaux de Télécommunication

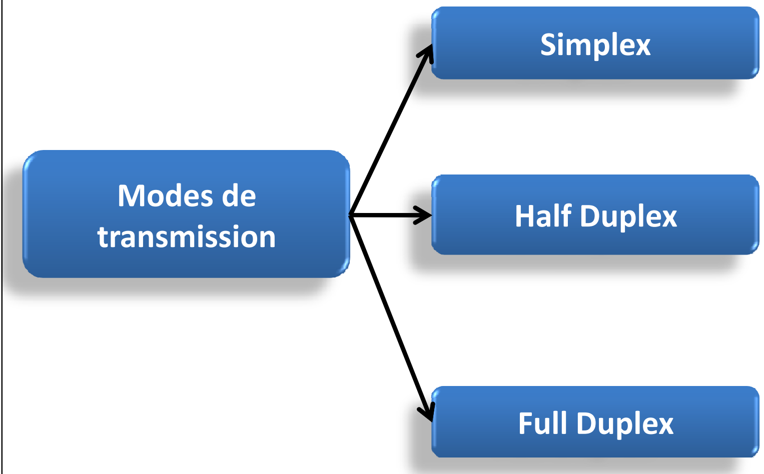
Chapitre 2
Transmission de données au niveau physique

Dr. Amine DHRAIEF

PARTIE I: TECHNIQUES DE TRANSMISSION

MODES DE TRANSMISSION

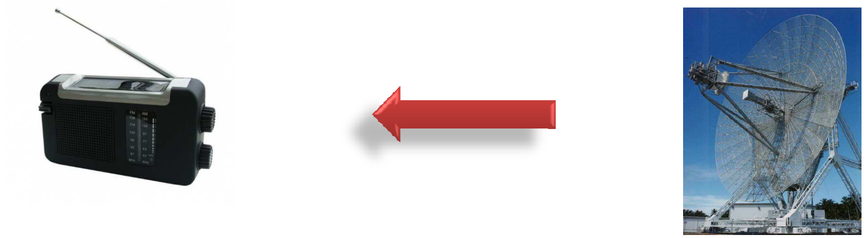
CLASSIFICATION DES MODES DE TRANSMISSION SELON L'ORGANISATION DES ÉCHANGES



Simplex

- **Une liaison dans laquelle les données circulent dans un seul sens**
  - utile lorsque les données n'ont pas besoin de circuler dans les deux sens
- **Définition de l'ANSI *(American National Standards Institute)***
  - *All signals can flow in only one direction*
- **Définition de l'ITU-T (*International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector*)**
  - *Signals can flow in only one direction at a time. At other times communications can flow in the reverse direction*

Simplex

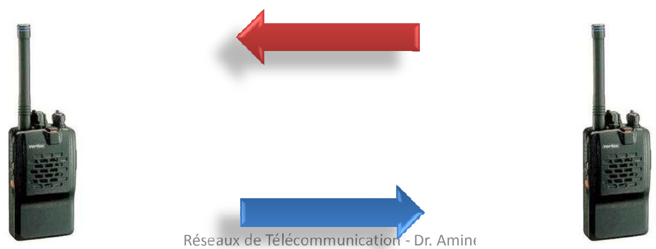


Exemple de simplex

- **Radiodiffusion**
  - radio FM/AM
- **Télédiffusion**
  - Transmission unilatérale de signaux (numériques/analogiques) vers un grand nombre de clients
- **Multicast dans l'Internet**
  - Méthode de diffusion de l'information d'un émetteur vers un groupe

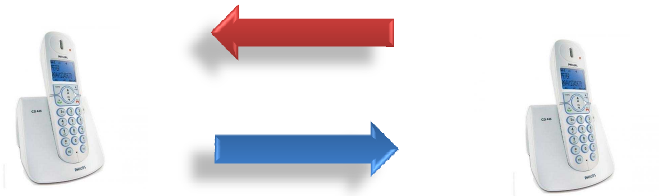
Half Duplex

- **Half Duplex ou semi-duplex**
  - Les données circulent dans un sens ou l'autre, mais pas les deux simultanément.
  - Chaque extrémité de la liaison émet à son tour.
  - Utilisation de la capacité totale de la ligne.
- **Exemple**
  - Talki-Walki

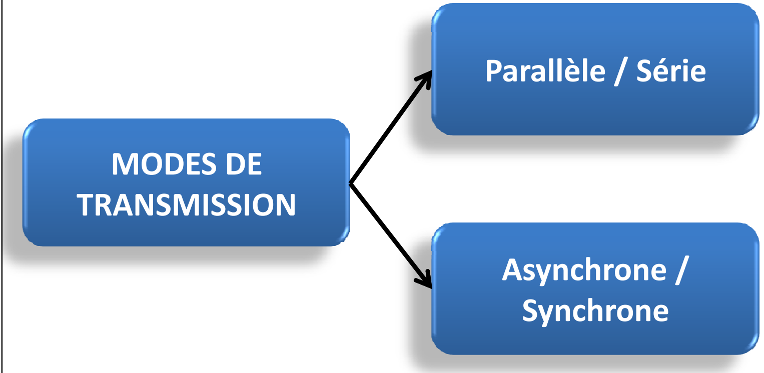


Full Duplex

- **Full Duplex ou Duplex Intégrale**
  - Les données circulent de façon bidirectionnelle et simultanément
  - L'association de deux canaux simplex
- **Exemple**
  - Téléphone, Full-duplex Ethernet



CLASSIFICATION DES MODES DE TRANSMISSION EN FONCTION DES PARAMÈTRES PHYSIQUES

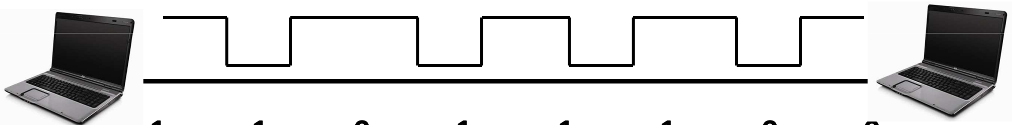


Transmission Parallèle

Transmission Parallèle

- **Coût de la transmission parallèle:**
  - Un nombre important de lignes nécessaires à la transmission
  - Ce mode est exclu pour la transmission de signaux à grande distance
- **Perturbations:**
  - Les lignes de transmission sont proches sur une nappe
  - Possibilité de diaphonie dégrade la qualité du signal.
- **les caractéristiques de transmission des différentes voies peuvent être différentes:**
  - les signaux se propagent à des vitesses différentes
  - accusent des retards inégaux et difficilement prévisibles à l'arrivé .

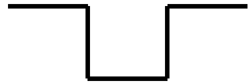
Transmission Série



1 1 0 1 1 1 0 0

11011100

Transmission Série



1	0	1
11	00	11
111	000	111

- **Comment le récepteur interprète-t-il le signal binaire ci-dessus si on ne connaît pas la durée d'un bit ?**
- **Est-ce 101 ou 110011 ou 111000111 ?**
- **Ne pas Connaître la durée d'un bit = synchronisation**.

Transmission Synchrone

- Solution de synchronisation d'une transmission série
  - **Envoyer l'horloge par une voie supplémentaire**
    - Il pourrait y avoir déphasage des signaux à l'arrivée, l'horloge d'arrivée ne serait donc pas fiable
  - **Utilisé des horloges synchrones**
    - elles sont excessivement chères pour des applications banales de transmission
  - **Utilisé des codes autoporteurs d'horloge**

Transmission Asynchrone

- **Le récepteur n'est pas parfaitement synchrone avec l'émetteur**
- **Le récepteur possède une horloge interne dont la période est aussi proche que possible de celle de l'émetteur**
- **Le récepteur découvre le *début* de transmission d'un octet au moment de la réception d'un premier bit appelé *"bit de start"*.**
  - Il va ensuite supposer que son horloge à lui est proche de celle de l'émetteur et décoder le reste de l'octet qui arrive.
- **Il peut y avoir erreur si**
  - l'horloge du récepteur est assez différente de celle de l'émetteur
  - si la séquence binaire envoyée est trop longue (généralement cette séquence est d'un octet seulement).
- **En pratique, cette méthode s'avère très sûre quoiqu'un peu lente.**

Transmission Asynchrone: Bit de START

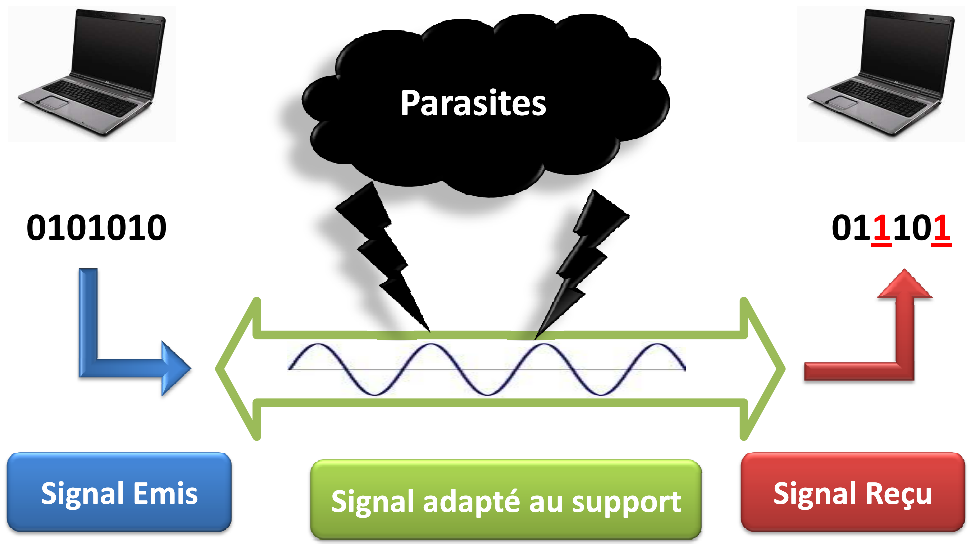
- Le **début de la transmission** d'un mot binaire (octet en général), est marqué par le passage du signal au niveau logique 0
- Ce niveau doit être **maintenu pendant un temps T** dont la **valeur** est une **caractéristique** de la **transmission**.
  - Valeur commune au transmetteur et au récepteur. On l'appelle **temps de bit**
  - Par ce moyen, l'émetteur indique au récepteur le début de la transmission d'un mot binaire.

Transmission Asynchrone: Nombre de Bit

- Les bits constituant le mot binaire à transmettre **sont envoyés un par un en** commençant par le bit de **poids le plus faible.**
- L'octet **01011001** est envoyé dans l'ordre : **10011010**.
  - Le **temps** alloué à **l'état de chaque bit** est le **temps T**

MODÉLISATION DU SUPPORT DE TRANSMISSION

Modélisation du support de transmission



Modélisation du support de transmission

- **Les supports de transmission ne sont pas parfait**
  - Atténuation
  - Déphasage
  - Bruit
  - Echo…
- **Les défauts du support limitent la transmission**
  - Débit
  - Délai
  - Etendu
- **Adapter les techniques de transmission aux caractéristiques du support**

Signal & Onde

- **Un signal est une variation dans le temps d'un phénomène physique.**
- **La variation se propage dans l'espace en formant une onde**
  - Exemple: une vague à la surface de l'eau

→ En contrôlant les variations on peut transmettre des informations à un destinataire qui observe les variations.

Signal & Onde

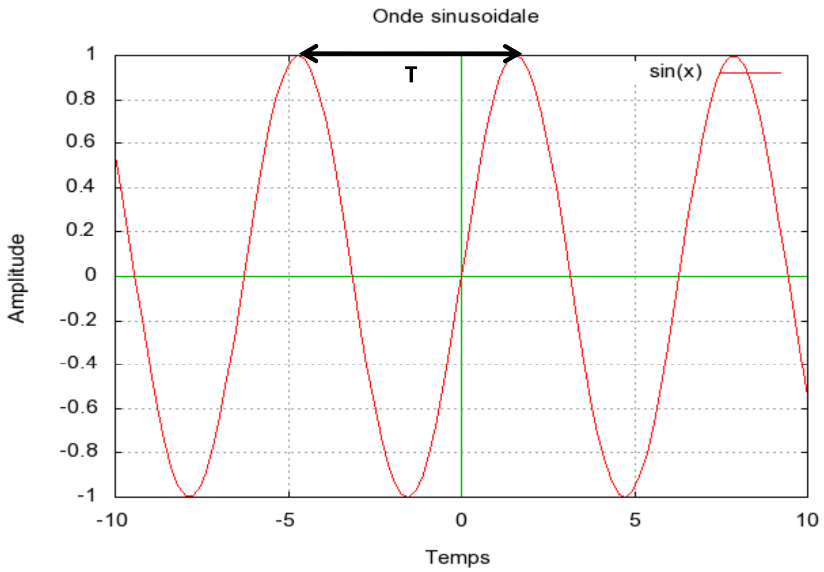
- **Lorsqu'on parle:**
  - Les vibrations des cordes vocales provoquent des variations de la pression de l'air.
  - Les variations de pression d'air se propagent autour de soi comme autant de bulles concentriques.
  - Dès qu'une bulle atteint l'auditeur, la pression d'air associée à cette bulle est détectée par son oreille puis analysée par son cerveau.

  →L'information est transmise.
- **En télécommunications, on crée un signal à l'aide de variations de potentiel électrique ou électromagnétique.**
- **Les capteurs sont des composants électroniques.**

L'onde sinusoïdale

- **L'onde sinusoïdale**
  - est le plus simple des signaux
  - est facilement générée
  - n'importe quel signal peut être exprimé à partir d'ondes sinusoïdales.
- $s(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$
  - A : Amplitude
  - ω : Pulsation = 2 π / T ; avec T = période
  - φ : Phase à l'origine
  - $\omega t + \varphi$: Phase instantanée

L'onde sinusoïdale



Puissance des signaux

- **Les signaux ont une puissance relativement faible, mesuré en milliwatt (mW).**
- **On se réfère le plus souvent aux rapports de puissance: puissance reçue ($P_{signal\ reçu}$ ou P_2) par rapport à la puissance envoyé ($P_{signal\ émis}$ ou P_1)**
  – Comme ces rapports sont très faibles, on utilise les <u>logarithmes décimaux (log)</u> (à base de 10)
  – <u>Ce rapport s'exprime en décibel (dB)</u>

Les Filters

- **Filtre passe bas**
  – laisse passer <u>les basses fréquences</u> et atténue les hautes fréquences, c'est-à-dire les fréquences supérieures à la fréquence de coupure
- **Filtre passe haut**
  – laisse passer <u>les hautes fréquences</u> et atténue les basses fréquences, c'est-à-dire les fréquences inférieures à la fréquence de coupure.
- **Filtre passe-bande**
  – ne laissant passer qu'une bande ou intervalle de fréquences compris entre une fréquence de coupure basse et une fréquence de coupure haute du filtre.

Les Filters

- **Deux données caractérisent un filtre :**
  – **La fréquence de coupure (fc)**, ou fréquence à partir de laquelle on considère que toutes les fréquences supérieures et (ou) inférieures sont atténuées d'une valeur donnée (généralement–3 dB).
  – **La pente de la courbe d'affaiblissement** qui s'exprime en dB par octave (Une octave correspond à une variation de fréquence dans un rapport de 1 à 2.)

Modélisation d'un support de transmission

- **Bande passante: la largeur, mesurée en hertz, d'une plage de fréquences f2 - f1.**
  - **Désigne la différence entre la plus haute et la plus basse fréquence du signal**
- **Gain = 10 log($P_{signal\ reçu}$ / $P_{signal\ émis}$)**
- Un support de transmission se comporte généralement comme **un filtre passe bande**
  - Ne laissant passer que les signaux dont les fréquences sont comprises entre une fréquence basse (f_b) et une fréquence haute (f_h).
- La **bande passante (capacité)** d'un support de communication
  - correspond à la plage de fréquences où il présente les meilleurs caractéristiques de transmission

Modélisation d'un support de transmission

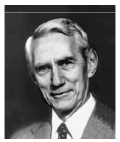
- La **bande passante** à **n décibels** (dB) est la **plage de fréquences** dans laquelle le rapport Ps/Pb (appelé le rapport signal sur bruit ou *SNR signal to noise ratio ou S/B*) vérifie
  - **10log (P_{signal} /P_{bruit}) ≤ n dB**
- **Le SNR:**
  - **Infini:** A la source du signal original (dont le bruit est nul), et ne peut que décroître lors de la transmission.
  - **Nul**: Le signal reçu ne permet plus de discerner de façon fiable le signal original du bruit, leurs puissances respectives étant égales
  - **Négatif:** on ne percevra que le bruit
  - **Positif:** support de transmission de bonne qualité

Modélisation d'un support de transmission

- **Le ratio Signal/Bruit s'exprime sous la forme d'un Logarithme base 10:**
  - **SNR(db) = 10 log(P_{signal} /P_{bruit}) (parfois noté 10log(S/B))**

Formule de Shannon

- **Débit théorique maximum** d'un support soumis à du bruit : **$D = W \log_2 (1 + P_{signal} /P_{bruit})$**
  - Le débit **D** en **bits/s**
  - la bande passante **W** en **Hz**
  - **P_{signal} / P_{bruit}** est obtenu à l'aide du rapport signal sur bruit exprimé en décibel **dB**



Claude Shannon (USA 1916- 2001)

Perturbation du signal transmis

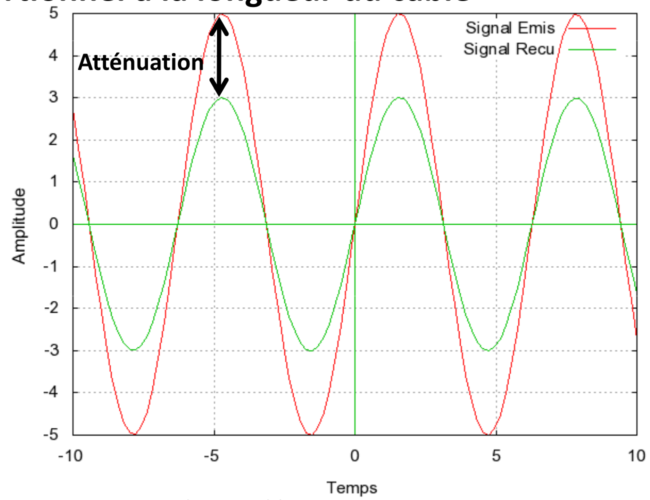
- **Lorsqu'on transmet un signal sur un lien de communication, il arrive toujours déformé à l'autre bout.**

- **Autrement dit les réseaux ne sont pas parfaits**
  - ils introduisent des variations non désirées dans les signaux qu'ils transportent.

- **Lorsqu'un signal analogique est ainsi modifié, cela introduit du bruit dans le message.**
  - Plus la distance est grande, plus le signal est susceptible d'être déformé.

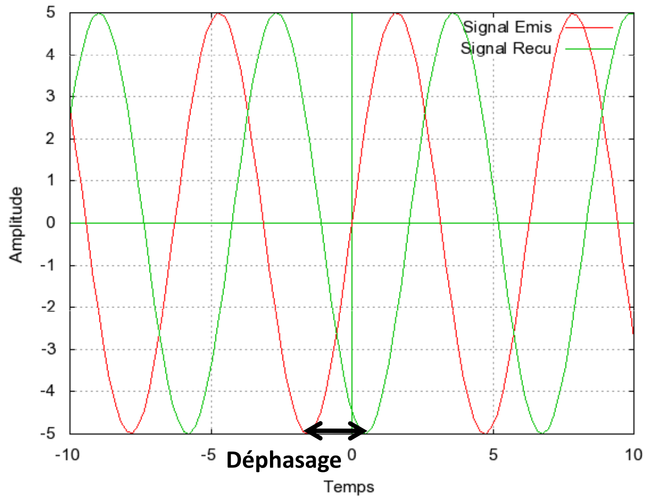
Perturbation du signal transmis Affaiblissement

- **L'atténuation est la réduction de l'amplitude et de l'énergie d'un signal à travers le médium qu'il traverse.**
- **proportionnel à la longueur du câble**



Perturbation du signal transmis Déphasage

- **Le déphasage entre deux ondes est la différence entre leurs phases.**



Perturbation du signal transmis Bruit

- **Signal qui ne contient aucune information et qui vient s'ajouter à l'information pertinente à transmettre**

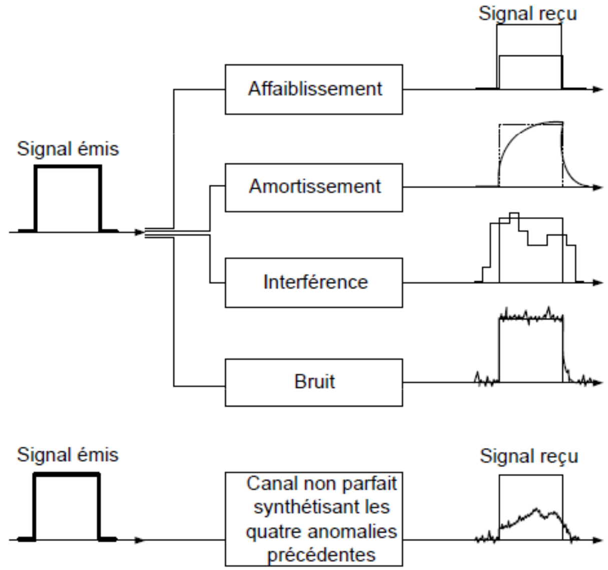
- **Bruit blanc**
  - Origine : agitation thermique des porteurs de charges
  - De faible puissance
  - Sur une large plage de fréquences

- **Bruit Impulsifs**
  - Origine:
    - organes électromécaniques, microcoupures.
    - Sources électriques proches qui induisent des courants électriques sur la ligne de transmission
  - De forte puissance
  - De faible durée

Autres phénomènes

- **Diaphonie** : couplage parasite entre lignes voisines
  - influence électromagnétique
  - placement des câbles, blindage
- **Echo :** réflexion du signal
  - suppresseur d'écho

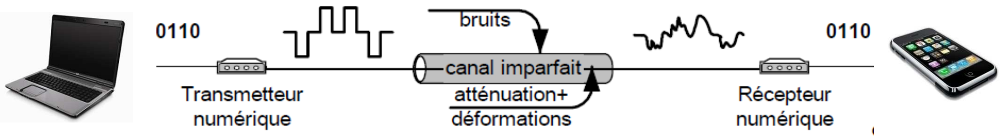
Perturbation du signal transmis



Transmission de données analogique numérisée

- **Pour profiter de la robustesse de la transmission numérique, la majorité des compagnies de téléphone ont converti leurs réseaux en remplaçant la transmission analogique par une transmission numérique.**
- **Pour faire cette conversion, il faut d'abord transformer les signaux analogiques sous une forme numérique à l'aide de trois procédés complémentaires :**
  1. l'échantillonnage
  2. la quantification
  3. le codage

Transfert d'information



Nature des données

Type de transmission

Nature des données

- **Les données à transmettre peuvent être de nature analogique ou numérique**
  - **Analogique:** composées de valeurs qui varient de façon continue (température, voix, signal de télévision,…)
  - **Numérique:** composées de valeurs discrètes, c'est-à-dire que les données sont représentées par un ensemble fini ou dénombrable de valeurs distinctes ou séparées (nombres, caractères, pixels,…)

Types de transmission

- **Pour être transmises sur un canal de communication, les informations doivent être transformées en signaux électriques (ou électromagnétiques).**
- **Bien qu'un signal soit de nature essentiellement analogique, on distingue quand même (abus de langage commode) deux formes de transmission**
  - Analogique
  - Numérique

Types de transmission Analogiques

- **le signal représente directement la valeur de l'information analogique qu'elle transmet,**
  - soit par les variations de la tension du signal,
  - de la fréquence du signal
  - ou par les variations d'une autre caractéristique physique

Transmission analogique

- **Transmission analogique d'informations analogiques :**
  - émission de la parole sur le réseau téléphonique, du son sur les ondes radio, d'images de télévision sur le réseau de télédiffusion,...
- **Transmission analogique d'informations numériques :**
  - transmission de données informatiques sur des lignes téléphoniques, par satellite,...

Types de transmission Numérique

- **le signal est constitué d'une séquence de signaux élémentaires transmis les uns après les autres, chacun durant une brève période de temps.**

- **Les signaux sont choisis parmi un ensemble fini de valeurs ou formes prédéfinies (voltage, fréquence ,...)**

Transmission numérique

- **Transmission numérique d'informations numériques :**
  - transmission de données informatiques en bande de base sur fibres optiques,...

- **Transmission numérique d'informations analogiques :**
  - transmission de la parole, du son ou d'images en bande de base,...

Transmission de données analogique numérisée

- ***L'échantillonnage consiste à choisir un certain nombre de moments* prédéfinis dans le temps et à observer le niveau de tension du signal analogique à chacun de ces moments**

- **Les valeurs ainsi observées sont appelées *les échantillons*.**

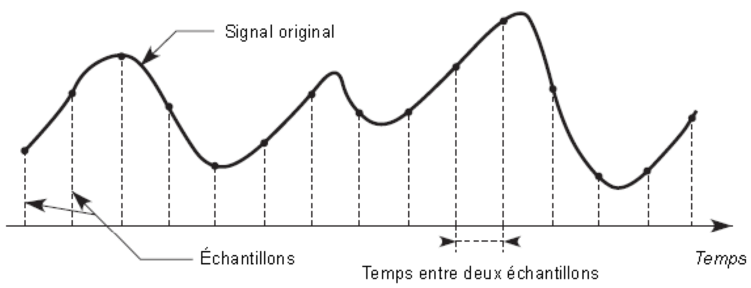
- **Le délai *entre les* échantillons doit être assez court pour s'assurer de bien observer toutes les variations importantes du signal.**

- **Pour la voix on échantillonne généralement 8000 fois par seconde.**

La numérisation des signaux analogiques

- **Trois opérations sont nécessaires pour la numérisation des signaux analogiques**
  - **l'échantillonnage:** passage d'un **espace de temps continu** à un **espace de temps discret**
  - **la quantification :** passage d'un **espace de valeurs continu** à un **espace de valeurs discret**
  - **le codage: chaque niveau** quantifié de valeurs **est codé** sur un nombre déterminé de bits

L'échantillonnage



L'échantillonnage

- **Consiste à prendre des points du signal analogique au fur et à mesure qu'il se déroule.**
- **Plus la bande passante est importante, plus il faut prendre d'échantillon par seconde.**
- **C'est le théorème d'échantillonnage qui donne la solution:**
  - si un signal f(t) est échantillonné **à intervalle régulier dans le temps**
  - et à un **taux supérieur au double de la fréquence significative la plus haute**,
  - les **échantillons** contiennent **toutes les informations** du signal original.
  - En particulier, la fonction f(t) peut être reconstituée à partir des échantillons.

Théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon

- **la fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal, afin de convertir ce signal d'une forme analogique à une forme numérique**
- **La la fréquence d'échantillonnage d'un CD audio, (normalisé à 44,1 kHz)**
  - L'oreille humaine peut capter les sons jusqu'à 16 kHz, quelquefois jusqu'à 20 kHz.
  - Il convient donc, lors de la conversion, d'échantillonner le signal audio à au moins 40 kHz

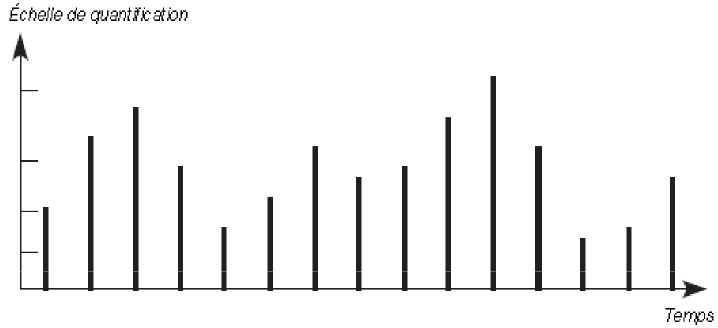
La quantification

- **Pour compléter le processus de numérisation du signal on attribue à chaque échantillon un nombre entier qui représente le plus fidèlement possible le niveau de tension observé, c'est la *quantification*.**
- ***La quantification fait perdre un peu de précision,* plus ou moins selon la finesse de la grille d'attribution des nombres.**
- **Pour la voix, on utilise normalement une grille à 256 niveaux (les nombres ont donc 8 bits).**

La quantification

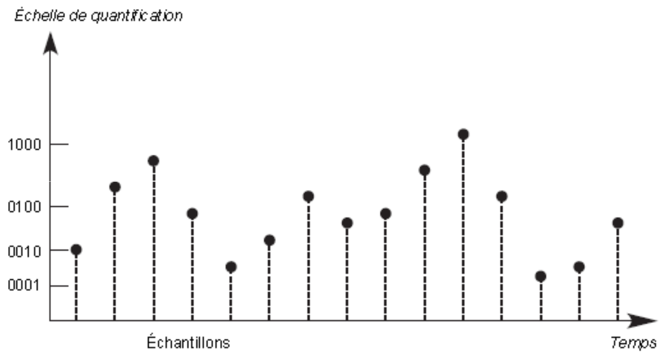
- Consiste à représenter un échantillon par une valeur numérique au moyen d'une loi de correspondance.
- Il convient de trouver cette loi de correspondance de telle sorte que la valeur des signaux ait le plus de signification possible.
- Si tous les échantillons sont à peu près égaux, il faut essayer, dans cette zone délicate, d'avoir plus de possibilités de codage que dans les zones où il y a peu d'échantillons.

La quantification



Le codage

- Consiste à affecter une valeur numérique aux échantillons.
- Ce sont ces valeurs qui sont transportées dans le signal numérique



Numérisation de la parole téléphonique

- La numérisation de la parole téléphonique s'effectue généralement au moyen des méthodes classiques
  - PCM (Pulse Code Modulation) en Amérique du Nord
  - MIC (modulation par impulsion et codage) en Europe
- Ces méthodes présentent de légères différences, dont la plus visible concerne le débit de sortie
  - 56 Kbit/s en Amérique du Nord
  - 64 Kbit/s en Europe

Numérisation de la parole téléphonique

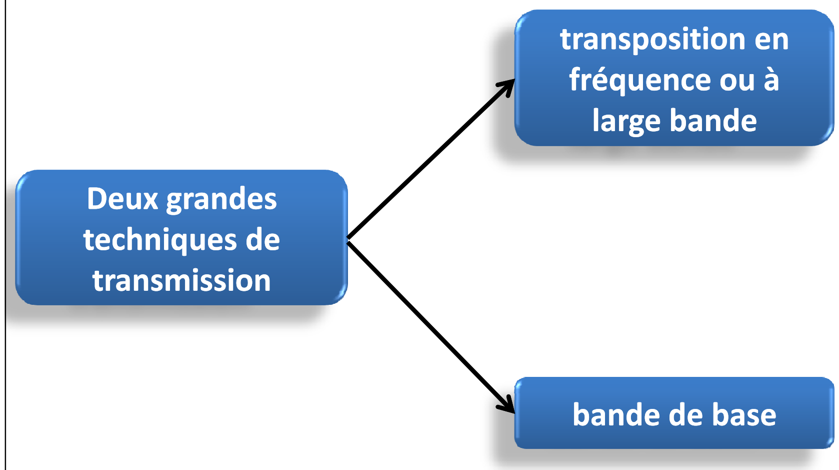
- Le codage s’effectue soit sur **128** valeurs (PCM), soit sur **256** valeurs (MIC), ce qui demande, en binaire, **7 ou 8 bits** de codage.
- **<u>Débit de la numérisation de la parole téléphonique est obtenue en multipliant le nombre d’échantillon/section par le nombre de bits.</u>**
  – 8 000 × 7 = 56 Kbit/s en Amérique du Nord
  – 8 000 × 8 bit/s = 64 Kbit/s en Europe.

Numérisation de la parole téléphonique

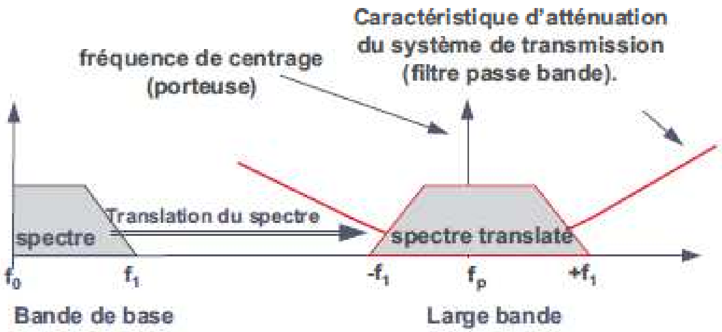
- **La largeur de bande de la parole téléphonique analogique est de 3 200 Hz.**
- **Pour numériser ce signal correctement sans perte de qualité, déjà relativement basse, il faut échantillonner au moins 6 400 fois par seconde.**
  – Dans la normalisation, on a adopté la valeur de **8 000 fois par seconde.**
- **L’amplitude maximale permise se trouve divisée en 128 échelons positifs pour la version PCM**
  – auxquels il faut ajouter **128** échelons négatifs dans la version européenne MIC.

LES TECHNIQUES DE TRANSMISSION

Les techniques de transmission



Les techniques de transmission



TRANSMISSION À LARGE BANDE

Transmission à large bande

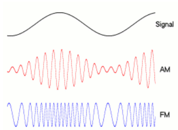
- **En transmission large bande, le spectre du signal numérique est translaté autour d'une fréquence centrale appelée porteuse.**
- **Elle est réalisée par un organe appelé modulateur.**
  - En réception le signal doit subir une transformation inverse, il est démodulé.
  - Le modem, contraction de modulation/démodulation, est un équipement qui réalise la modulation des signaux en émission et leur démodulation en réception.

Transmission à large bande
Porteuse

- **Une porteuse est un signal sinusoïdal de fréquence et amplitude constantes**
  - Onde utilisée pour faciliter la transmission d'un signal
  - ne portant aucune autre information que celle de sa présence
- **La porteuse est**
  - **modulée** : on faire varier les paramètres de la porteuse pour coder un ou plusieurs bits à chaque changement d'état
  - en vue, de sa **diffusion au moyen d'un émetteur**

Définition de la modulation

- La **modulation du signal** est une opération de traitement du signal qui permet de l'**adapter** à un **canal de communication**



- **Signal : $A\cos(2\pi f t - \varphi)$**
  - **Modulation de fréquence:** les variations portent sur **f** (**FSK, *Frequency Shift Keying)***
  - **Modulation d'amplitude:** les variations portent sur ***A*** (**ASK, *Amplitude Shift Keying)***
  - **Modulation de phase:** les variations portent sur $\boldsymbol{\varphi}$ (**PSK, *Phase Shift Keying)***

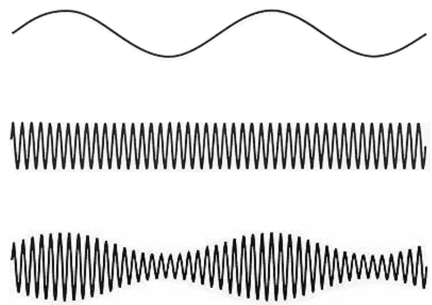
Modulation d'amplitude

- **S(t)= $A(t)\cos(2\pi f_0 t - \varphi_0)$**
- **Faire varier l'amplitude d'un signal de fréquence élevée en fonction d'un signal de basse fréquence.**
  - Ce dernier est celui qui contient l'information à transmettre (voix, par exemple, recueillie par un microphone),
  - le premier étant le signal porteur (porteuse).

Signal utile

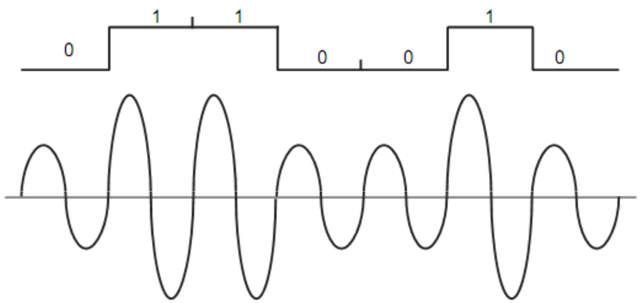
Porteuse

Signal modulé



Exemple de modulation d'amplitude

- **La différence entre 0 et 1 se traduit par une différence d'amplitude du signal**



Modulation de fréquence

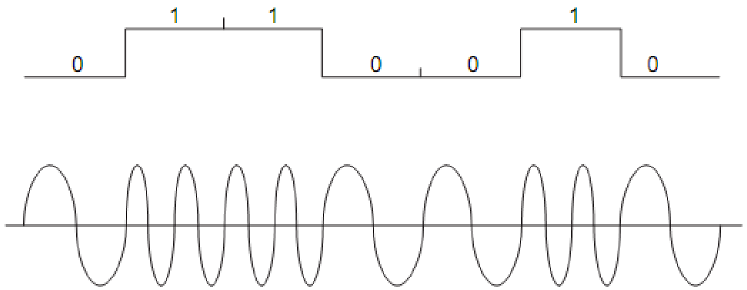
- **S(t)= $A_0\cos(2\pi f(t) t - \varphi_0)$**

- En modulation de fréquence:
  - l'information est portée par une modification de la fréquence de la porteuse, et non par une variation d'amplitude.

- La modulation de fréquence est plus robuste que la modulation d'amplitude pour transmettre un message dans des conditions difficiles (atténuation et bruit importants).

Exemple de modulation de fréquence

- **En modulation de fréquence, l’émetteur a la possibilité de modifier la fréquence d’envoi des signaux suivant que l’élément binaire à émettre est 0 ou 1**



Modulation de Phase

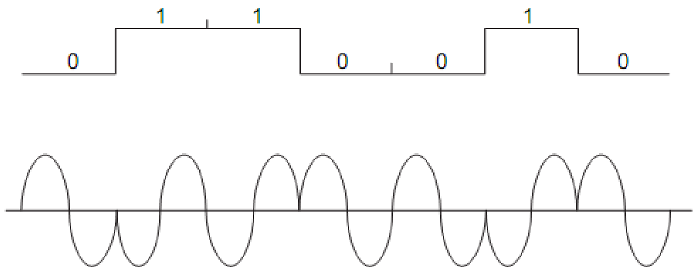
- **S(t)= $A_0\cos(2\pi f_0 t - \varphi(t))$**

- **Transmettre un signal par la modulation de la phase d'un signal porteur**

Exemple de modulation de phase

- **La distinction entre 0 et 1 est effectuée par un signal qui commence à des emplacements différents de la sinusoïde, appelés phases.**

- **les valeurs 0 et 1 sont représentées par des phases respectives de 0° et de 180°.**



TRANSMISSION EN BANDE DE BASE

Transmission en bande de base

- **On qualifie de systèmes de transmission en bande de base les systèmes qui n'introduisent pas d'écart de fréquence entre les signaux émis et ceux reçus.**

- **Cette définition n'exclut nullement des modifications du signal pour mieux l'adapter aux caractéristiques du support de transmission.**

Transmission en bande de base

- On appelle **codage, l'opération qui fait correspondre à un symbole appartenant à un alphabet,** une représentation binaire (codage à la source).

- On désigne par **transcodage, ou codage en ligne, l'opération qui consiste à substituer au signal numérique (représentation binaire) un** signal électrique mieux adapté à la transmission

Transmission en bande de base

- **Le codeur transforme une suite $\{d_k\}$ k≥0 initiale généralement binaire (de bits) en une suite codée $\{a_k\}$ k≥0 (de symboles) généralement binaire.**
  - Le décodeur fait l'opération inverse.

- **Le but du codage est d'adapter la suite de bits à transmettre aux caractéristiques de la transmission.**

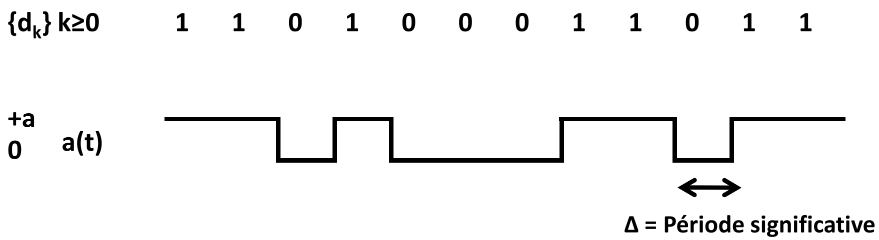
- **S'il n'y a pas de modulation par transposition en fréquence, le codage est dit en bande de base**

Transmission en bande de base

- **La transmission est dite en bande de base lorsque le signal ne subit pas de transposition en fréquence.**
  - Dans ce cas, le signal présente souvent un aspect rectangulaire
  - la fonction de modulation simple utilisée est rectangulaire.

- **On transforme une fonction discrète $\{d_k\}$ k≥0 en fonction continue d(t) à l'aide de la relation suivante :**
  - **$d(t)= \Sigma\, d_k\, R_T\,(t- kT - \tau_0)$**
  - **τ_0** instant initial
  - **R_T (t)**: la fonction rectangulaire sur l'intervalle [0,T] définit par **$R_T(t) = 1$ si $t \in [0,T]$; 0 sinon**

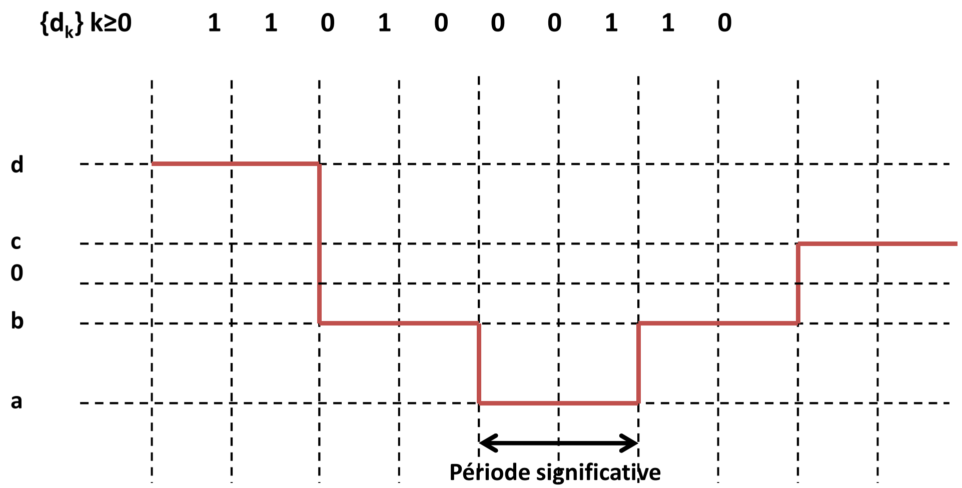
Exemple



Codage binaire de valence N = 2

Et pour N = 4 ?

Codage binaire de valence N = 4



Fonctions d'un codeur/décodeur en bande de base

- Le signal numérique, issu du calculateur, présente une composante continue non nulle.
  - La composante continue représente la valeur moyenne du signal pour un intervalle de temps donné.
- Cette composante continue est inutile, elle ne transporte aucune information et provoque un échauffement (effet Joule) des organes d'extrémité (transformateurs d'isolement).
- Le comportement de filtre passe-bas du système introduit une distorsion de phase qui provoque l'étalement du signal.
- L'absence de transition, lors de la transmission d'une longue suite de 0 ou de 1, introduit un risque de perte de synchronisation des horloges.

Fonctions d'un codeur/décodeur en bande de base

- **Ces différentes considérations conduisent à**
  - transformer le signal numérique en un autre, tel que la composante continue soit réduite à son minimum ;
  - choisir une méthode de codage pour que le spectre du nouveau signal soit mieux adapté aux caractéristiques du support de transmission ;
  - et enfin, pour maintenir la synchronisation, assurer un minimum de transitions, même lors de la transmission de longues séquences de 1 ou de 0.

No Return to Zero NRZ

- **Le codage NRZ, est la méthode la plus simple pour coder un flux.**
- **Le codage est à deux niveaux :**
  - 1 logique → un premier niveau de voltage
  - 0 logique → un deuxième niveau de voltage
- **Il n'a pas de transition générée lors d'une longue séquence de 1 ou 0, ce qui rend la synchronisation difficile**

NRZ

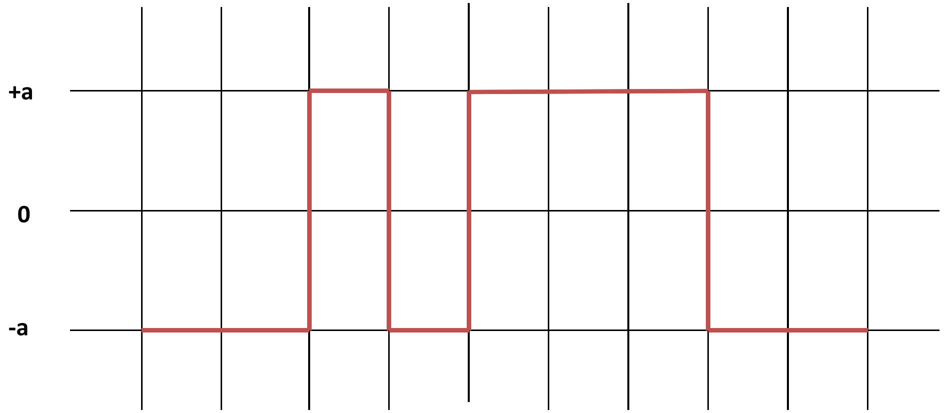
$d_k = 0 \Leftrightarrow a_k = a$

$d_k = 1 \Leftrightarrow a_k = -a$

0 ⇔

1 ⇔

$\{d_k\}\ k \geq 0$ 1 1 0 1 0 0 0 1 1



Code RZ (Return to Zero)

- **Le signal retourne à zéro à chaque pulsation**
- **« code autoporteur d'horloge »**
  - Ne nécessite pas l'envoie d'un signal d'horloge séparer ou tout autre source de synchronisation.
  - Cas particulier d'une longue série de 1 ou de 0 → perte de synchronisation possible.
  - Synchronisation maintenu dans la plupart des cas.
- **Code ternaire simple, limite les interférences entre symboles**
- **Code 1B/2T**
- **Utilise le double de la bande passante nécessaire à NRZ pour coder les mêmes donner**

RZ

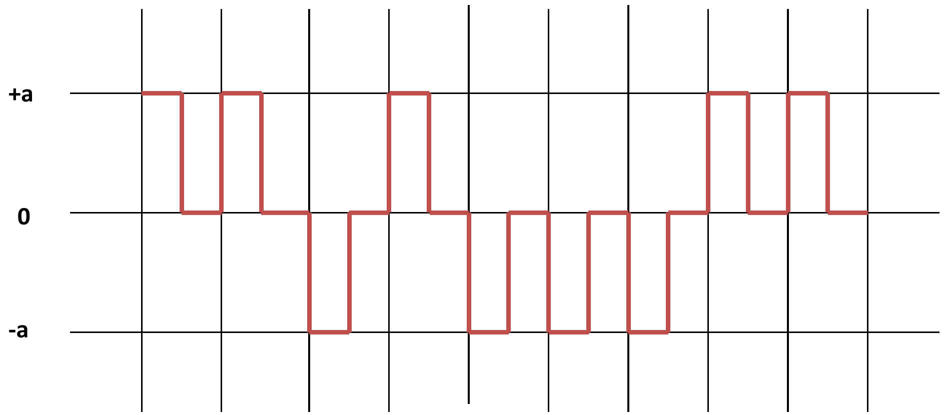
$d_k = 0 \Leftrightarrow a_k = [-a,0]$

$d_k = 1 \Leftrightarrow a_k = [a,0]$

1 ⇔

0 ⇔

$\{d_k\}\ k \geq 0$ 1 1 0 1 0 0 0 1 1



Non Return to Zero Inverted NRZI

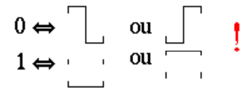
- Est une variante du codage NRZ
- Le 0 a été choisi comme élément de changement
- Facile à mettre en œuvre, bonne utilisation de la bande passante
- Indépendant de la polarité
- Horloge peut être perdu en cas d'envoie successif d'une suite de 1 logique
- Le bus USB utilise le codage NRZI Norme USB.
  - Pour éviter la perte d'horloge, un 0 est envoyé après six 1 consécutifs.
  - Le récepteur doit prendre en compte ces éléments de remplissage.

NRZI

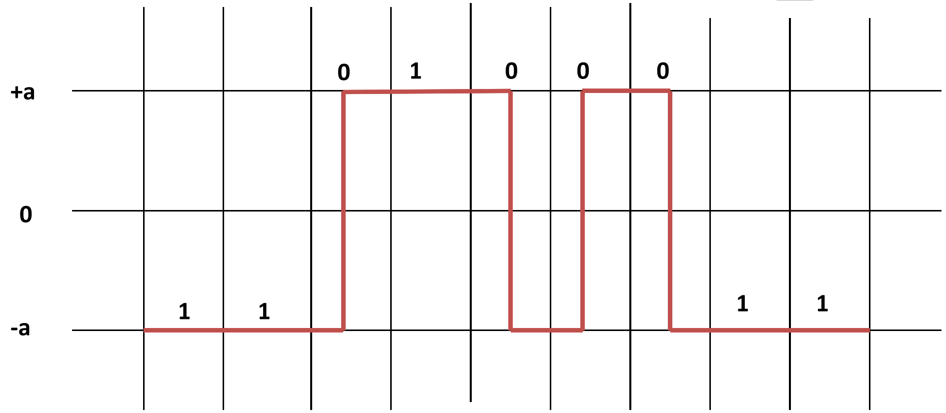
$d_k = 0 \Leftrightarrow a_k = [\alpha_k,\beta_k] / ((\alpha_k \neq \beta_k)$ and $(\alpha_k = \beta_{k-1}))$

$d_k = 1 \Leftrightarrow a_k = [\alpha_k,\beta_k] / ((\alpha_k = \beta_k)$ and $(\alpha_k = \beta_{k-1}))$

$\alpha_k \in \{-a,a\}$



$\{d_k\}\ k \geq 0$ 1 1 0 1 0 0 0 1 1



Code de Miller ou Delay Mode

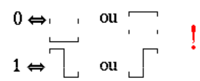
- Transition au milieu l'intervalle élémentaire du 1
  - front montant ou front descendant
- pas de transition au milieu l'intervalle élémentaire du 0
- une transition en fin l'intervalle élémentaire 0 si celui-ci est suivi d'un autre 0
- Code symétrique → indépendance de polarité
- Mise en œuvre simple, bande passante réduite, pas de perte de synchronisation sur les suites de symboles identiques.

Code de Miller

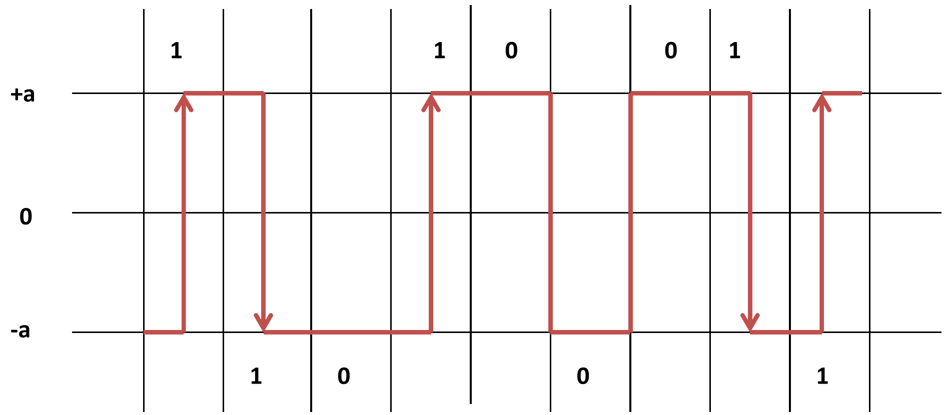
$d_k = 0 \Leftrightarrow a_k = [\alpha_k,\beta_k] / ((\alpha_k = \beta_k)$ and $(\alpha_k \neq \alpha_{k-1}))$

$d_k = 1 \Leftrightarrow a_k = [\alpha_k,\beta_k] / ((\alpha_k \neq \beta_k)$ and $(\alpha_k = \alpha_{k-1}))$

$\alpha_k \in \{-a,a\}$



$\{d_k\}\ k \geq 0$ 1 1 0 1 0 0 0 1 1



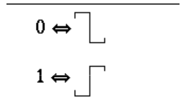
Code Manchester (Code Biphase, Code biphase_L(evel))

- **Transitions (IEEE 802.3 , Ethernet, RFID)**
  - 1 → transition du niveau bas vers le niveau haut
  - 0 → transition du niveau haut vers le niveau bas
  - L'inverse est aussi possible
- **Mise en œuvre simple, codage et décodage faciles**
- **pas de composante continue**
  - **donc pas de perte de synchronisation sur les suites de symboles identiques**
  - **code autoporteur d'horloge**
- **Utilise le double de la bande passante nécessaire à NRZ (par exemple)**

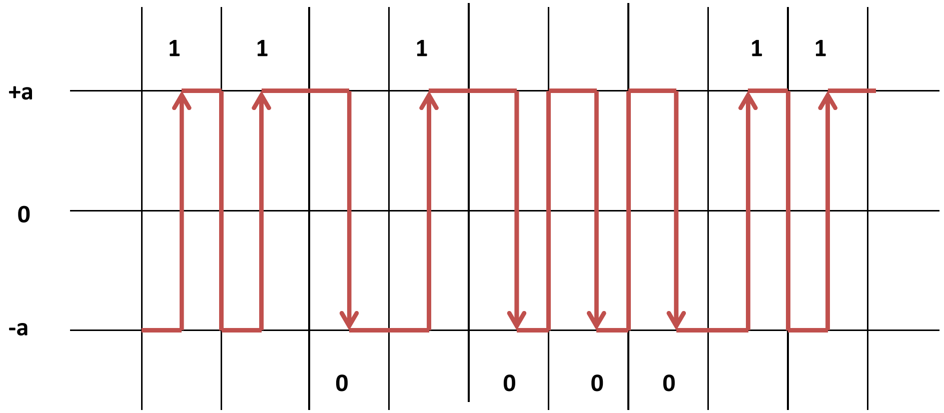
Code Manchester

$d_k = 0 \Leftrightarrow a_k = [a,-a]$

$d_k = 1 \Leftrightarrow a_k = [-a,a]$



$\{d_k\}\ k \geq 0$ 1 1 0 1 0 0 0 1 1



Code Manchester Différentiel (Biphase différentiel)

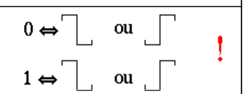
- **Transitions (IEEE 802.5, Token ring)**
  - 1 → transition dans le même sens que la précédente.
  - 0 → transition dans sens inverse de la précédente.
- **Mise en œuvre simple**
- **Codage et décodage facile**
- **Pas de composante continue**
  - pas de perte de synchronisation sur les suites de symboles identiques
  - code autoporteur d'horloge
  - Indépendance de polarité
- **Bande passante consommée importante**

Code Manchester Différentiel

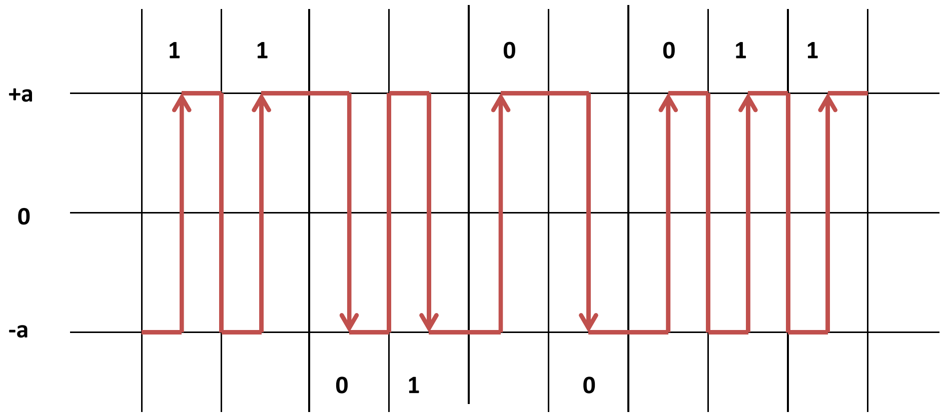
$d_k = 0 \Leftrightarrow a_k = [\alpha_k,\beta_k] \,/\, ((\alpha_k \neq \beta_k)$ and $(\alpha_k \neq \alpha_{k-1}))$

$d_k = 1 \Leftrightarrow a_k = [\alpha_k,\beta_k] \,/\, ((\alpha_k \neq \beta_k)$ and $(\alpha_k = \alpha_{k-1}))$

$\alpha_k \in \{-a,a\}$



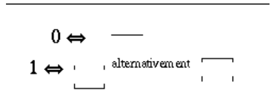
$\{d_k\}\ k \geq 0$ 1 1 0 1 0 0 0 1 1

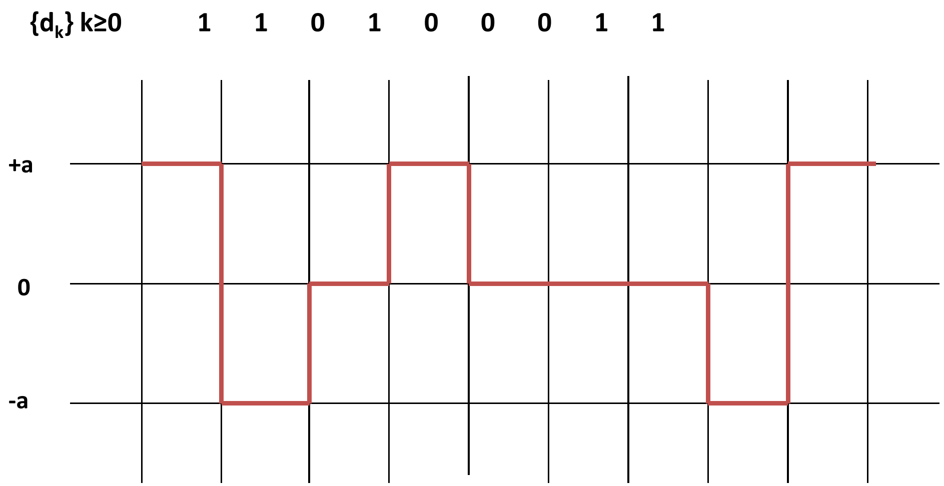


Code Bipolaire simple (AMI : Alternate Mark Inversion)

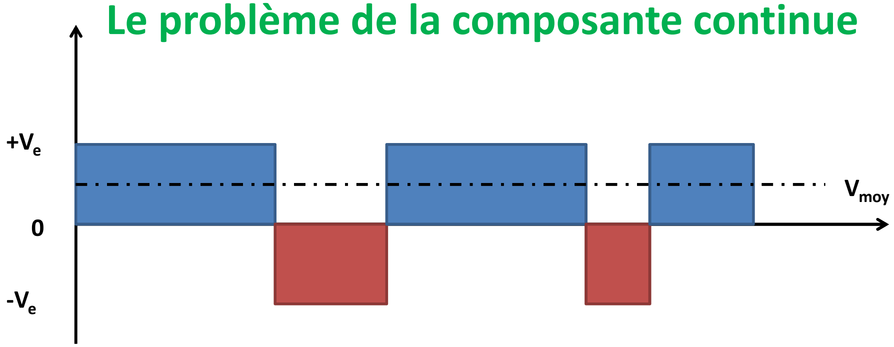
- **Trois niveau de codage:**
  - 0 : pas de signal
  - 1 : alternativement niveau positif ou négatif
- **Le signal peut présenter de longues séquences de zéros → *bit stuffing***
  - Si n est le nombre maximal d'états égaux consécutifs
  - chaque fois qu'un signal comporte n états identiques consécutifs on ajoute un bit à l'état inverse
  - Par exemple, si n = 5
    - la séquence suivante : 10000000001
    - sera codée : **100000<u>1</u>00001<u>1</u>**
- Code ternaire, équilibré, indépendant de la polarité, dérive de l'horloge (suite de 0)

Code Bipolaire simple (AMI : Alternate Mark Inversion)





Pourquoi Alterné ?
Le problème de la composante continue



- Un signal possédant **une valeur moyenne non nulle** se propage mal sur les lignes de transmission longue distance
  - pose des problèmes de traitement par les circuits électroniques des récepteurs

Code Bipolaire Haute Densité d'ordre *n (BHD n)*

- **Ajoute de la synchronisation à AMI**
- **Identique au codage AMI tant que le nombre de zéros consécutifs à coder est inférieur à n+1.**
  - basée sur la violation de l'alternance : bit de viol (noté V)
  - Une violation de codage consiste à générer un bit du même signe le le "+" ou le "-" qui précède.
  - C'est une violation, car les "+" et les "-" doivent normalement alterner.

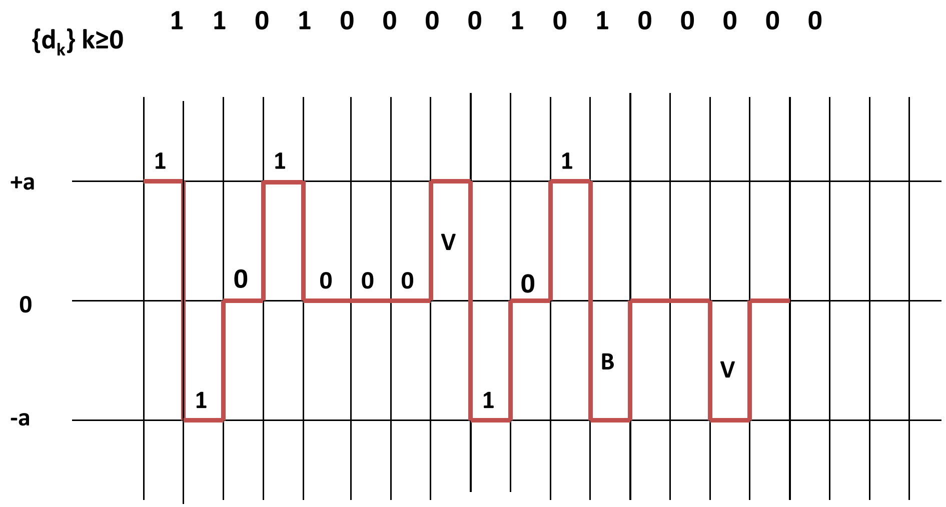
Code Bipolaire Haute Densité d'ordre *n (BHD n)*

- Les violations de codage produisent des signaux de même polarité proches les uns des autres.
  - Ce qui génère une valeur moyenne préjudiciable à sa propagation et à sa détection
- Le codage BHDn a prévu des **bits de balance** que nous désignerons par **B.**
  - s'ils sont bien distribués, vont rendre nulle la valeur moyenne du signal codé.
  - B suit la règle AMI (c'est "**+**" si le précédent signal non nul est "**-**" et inversement)

Code Bipolaire Haute Densité d'ordre *n (BHD n)*

- **Ce codage n'introduit pas de bits supplémentaires.**
  - les bits de violation V et les bits de balance B ne sont pas ajoutés
  - on change seulement la valeur du signal (nul pour un zéro) en un signal positif ou négatif suivant les cas.
- **Codage BHD3**
  - Un groupe de quatre zéros sera codé : **B 0 0 V**
    B est le bit de balance, V celui de violation.
  - Sauf pour le premier groupe qui sera codé **0 0 0 V**

Code Bipolaire Haute Densité d'ordre 3 *(BHD 3)*



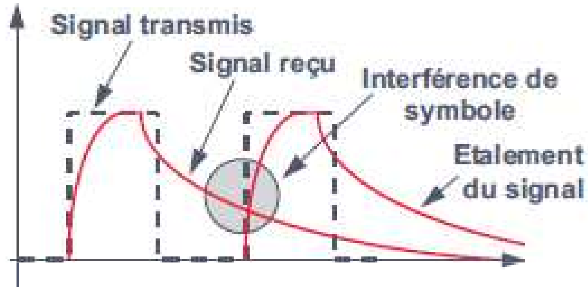
Limitations de la transmission en bande de base

- **La transmission en bande de base est une technique simple à mettre en œuvre**
- **Mais elle est limitée par la bande passante du canal de communication et par le rapport signal sur bruit de celui-ci.**

Critère de Nyquist

- **Une ligne ou canal de transmission se comporte comme un filtre passe-bas, les différentes composantes sont atténuées (distorsion d'amplitude) et retardées (distorsion de phase).**
- **L'une des conséquences les plus visibles est l'étalement du signal. Dans des conditions limites, cet étalement a pour conséquence que la fin d'une impulsion transmise se confond avec le début de la suivante.**
- **Les circuits électroniques ne peuvent, alors, distinguer deux impulsions successives, il y a interférence de symboles**

Critère de Nyquist



Critère de Nyquist

- **Il existe une relation étroite entre le nombre maximal de symboles (impulsions électriques) que le système peut admettre et la bande passante de celui-ci.**
- **Supposons:**
  - un signal de fréquence F,
  - deux instants significatifs peuvent être distingués.
  - Le premier correspond à la première alternance du signal, le second à la seconde.
- **En assimilant chaque alternance à une impulsion électrique, le nombre maximal d'impulsions que peut transmettre un système, par unité de temps, est, au plus égal au nombre d'alternances du signal (alternance positive pour un « 1 », alternance négative pour le « 0 », par exemple).**

Critère de Nyquist

- **Soit R_{max}, le nombre maximal de temps élémentaires par unité de temps (nombre d'impulsions), et F_{max}, la fréquence de coupure du système, ils sont liés par la relation :**

$$R_{max} = 2 * F_{max}$$

- **Si on assimile F_{max} à la bande passante (BP) du canal, on obtient la relation appelée critère de Nyquist :**

$$R_{max} \leq 2 \cdot BP$$

Critère de Nyquist

- Où R_{max} désigne le nombre maximal de transitions qu'un système peut supporter, et est appelé rapidité de modulation.
- La rapidité de modulation, grandeur analogue à une fréquence, s'exprime en baud et représente le nombre d'instants élémentaires du signal par unité de temps.
- La rapidité de modulation est aussi appelée vitesse de signalisation sur le support

Application au canal téléphonique

Quelle est la rapidité de modulation maximale admissible sur une voie téléphonique caractérisée par une bande passante (BP) allant de 300 à 3 400 hertz ?

Application au canal téléphonique

- **La bande passante a pour valeur :**

  $$BP = 3\,400 - 300 = 3\,100 \text{ Hz}$$

- **La rapidité de modulation maximale est :**

  $$R_{max} = 2 \cdot BP = 2 \cdot 3\,100 = 6\,200 \text{ bauds.}$$

- **Si durant un intervalle de temps significatif le symbole ne peut prendre que les valeurs 0 ou 1, le débit binaire du canal est égal à la rapidité de modulation.**
- **Pour la ligne RTC (Réseau Téléphonique Commuté) de l'exemple ci-dessus, le débit binaire ne peut excéder 6 200 bit/s.**

Application au canal téléphonique

Quelle est la capacité maximale de transmission sur une voie RTC caractérisée par une bande passante de 300/3 400 Hz et un rapport signal sur bruit de 1 000 ?

Application au canal téléphonique

- La capacité de transmission est donnée par la relation de Shannon :
  - *C = BP * log_2[1 + (S/N)]*
  - = (3 400 − *300) * log_2(1 + 1 000) =* 3100*9.96=30876 bit/s

- Ce débit maximal théorique correspond aux performances maximales que l'on peut obtenir sur une ligne téléphonique

Débit binaire et rapidité de modulation

- Le débit binaire D d'une voie de données est le nombre maximum de bits d_i transmis par seconde sur cette voie
  - **D = 1 / T (bits/s)** avec **T intervalle élémentaire**

- La rapidité de modulation R (exprimée en bauds) mesure le nombre maximum de symboles (élément de modulation émis en bande de base) transmis par seconde
  - **R = 1 / Δ (baud)** avec **Δ période significative**

- **1/Δ** est un **multiple** de **1/T** et le **nombre de niveaux N** est choisi de telle sorte que a(t) et d(t) aient le même débit d'information
  - **D = 1/T = log_2(N)/ Δ = R log_2(N) (bits/s)**

MULTIPLEXAGE

Problématique

- **Dans les télécommunications: Comment rentabiliser au mieux le lourd investissement que constituaient les lignes télégraphiques?**
  - Lignes télégraphiques transocéaniques mise en service en 1866

- **Assurer une transmission simultanée de plusieurs messages sur un seul fil électrique**

Economie d'échelle

- **Installation et entretien d'une liaison à haut débit partagé par plusieurs machines**

- **Très largement moins coûteux que l'installation et l'entretien de liaisons à bas débit beaucoup plus nombreuses**

Multiplexage
Définition

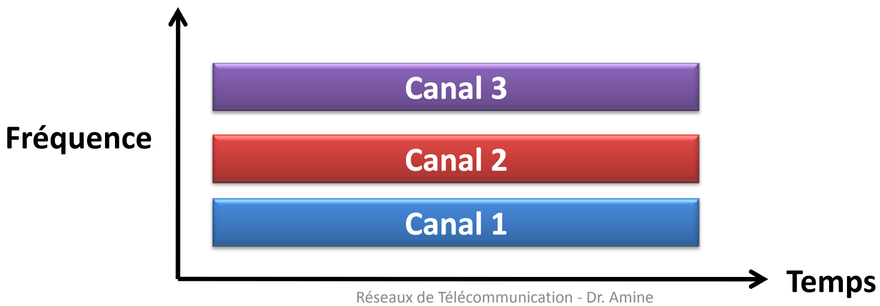
- **Technique qui consiste à faire passer deux ou plusieurs informations à travers un seul support de transmission**
  – Permet de partager une même ressource entre plusieurs utilisateurs

- **Deux types de multiplexage**
  – Multiplexage Fréquentiel (*FDM: Frequency Division Multiplexing*)
  – Multiplexage Temporel (TDM: Time Division *Multiplexing*)

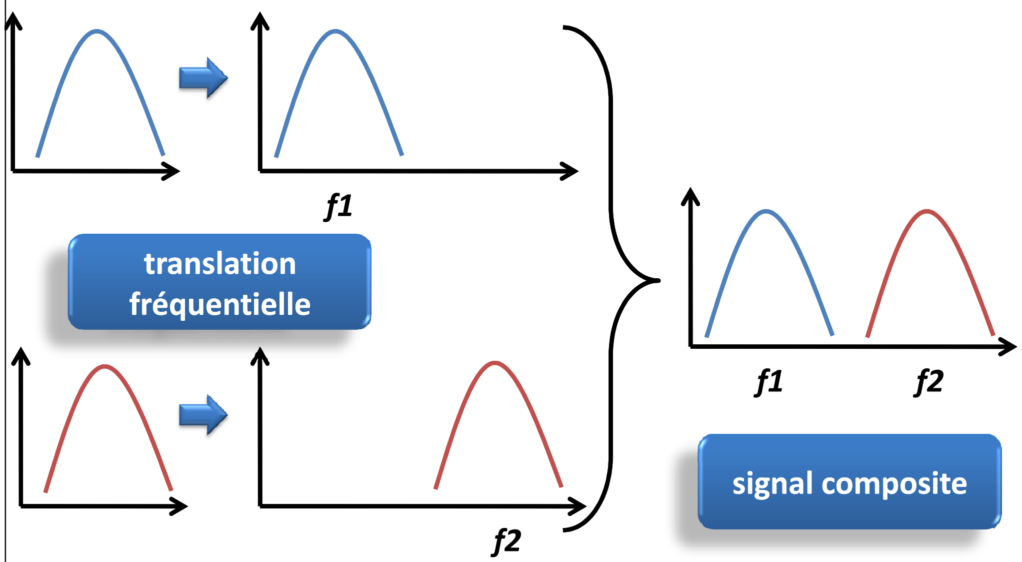
Multiplexage Fréquentiel: Définition

- **Partager la bande de fréquence disponible en un certain nombre de canaux (ou sous-bandes)**
  – Affecter en permanence chacun de ces canaux à un utilisateur exclusif

- **Technique adapter aux transmissions analogiques**



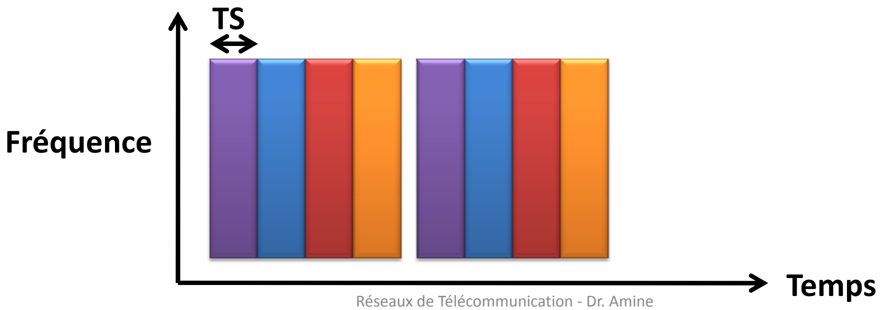
Multiplexage Fréquentiel: Principe



Multiplexage Temporel: Définition

- **Répartition du temps d'utilisation de la totalité de la bande passante en intervalles de temps prédéfinis (*Time Slot: TS*) entre les différentes communications**

- **Uniquement pour les données numérique**



APPLICATIONS

Exercice I

1. **Une image TV numérisée doit être transmise à partir d'une source qui utilise une matrice d'affichage de 450x500 pixels, chacun des pixels pouvant prendre 32 valeurs d'intensité différentes. On suppose que 30 images sont envoyées par seconde. Quel est le débit D de la source ?**

2. **L'image TV est transmise sur une voie de largeur de bande 4,5 MHz et un rapport signal/bruit de 35 dB. Déterminer la capacité de la voie.**

Correction Exercice I

1. Volume V = 33 750 000 bits (450*500*5*30) ; le débit D est D = 33,75 Mbits/s.

2. $C = W \log_2(1 + S/B)$ avec S/B est exprimée en rapport de puissances et non en décibels donc $C = W \log_2(1 + P_S/P_B)$
   – P_S/P_B = exp [(Ln(10)/10).S/B] = 3162
   – d'où C = 4.5*(Ln(3163)/Ln(2)) = 52 Mbits/s.

Exercice II

1. **Une voie possède une capacité de 20 Mbits/s. La largeur de bande de la voie est de 3 MHz. Quel doit être le rapport signal/bruit ?**

2. **Une voie de transmission véhicule 8 signaux distincts ; sa rapidité de modulation est R = 1200 bauds. Quel est le débit binaire de cette ligne ?**

Correction Exercice II

1. $1 + P_S/P_B$ = exp [C.Ln(2)/W] = 101 -→ d'où P_S/P_B =100.
   – En décibels, S/B = 10 $\log_{10}(P_S/P_B)$ = 20 dB.

2. un signal transporte 3 bits (8 combinaisons possibles) ; donc D = 3*R = 3600 bits/s

Exercice III

1. **Une voie de transmission véhicule 16 types de signaux distincts ; sa rapidité de modulation est R = 1200 bauds. Quel est le débit binaire de cette ligne ?**

2. **Une voie de transmission véhicule 8 types de signaux distincts. Quelle est la quantité d'information binaire transportée par chaque signal ?**

3. **Le rapport signal sur bruit d'une voie de transmission est de 20 dB ; sa largeur de bande est de 3100 Hz. Quelle est, environ, la capacité théorique de cette voie ?**

Correction Exercice III

1. $\log_2(16) = 4$, $D = R*\log_2(N)$ → D = 1200 * 4 = 4800 bits/s

2. $8 = 2^3$→ chaque signale transporte 3 bits

3. $C= W\log_2(1+Ps/Pb)$ → $C= 3100*\log_2(101)$

Exercice IV

- **Quelle est la capacité d'une ligne pour téléimprimeur de largeur de bande 300 Hz et de rapport signal/bruit de 3 dB ?**

Correction Exercice IV

- $C= W\log_2 (1+Ps/Pb)$
- $10 \text{ Log}_{10}(S/B) = n \text{ dB}$
- $10 \text{ Log}_{10}(P_S/P_B) = 3\text{dB} \rightarrow P_S/P_B = 1.99$
- $C= 300 * \log_2 (1+ 1.99) = 475 \text{bit/s}$

Exercice V

- **La trame MIC permet de multiplexer plusieurs voies à 64 Kbits/s.**

1. **Sachant que la trame MIC correspond à un débit de 2 Mbits/s, combien de voies peuvent-elles ainsi être multiplexées dans une trame MIC ?**
2. **Une application particulière, comme la visioconférence, nécessite un débit de 192 Kbits/s. Indiquer comment, avec une trame MIC, il est possible d'atteindre ce débit.**

Correction Exercice V

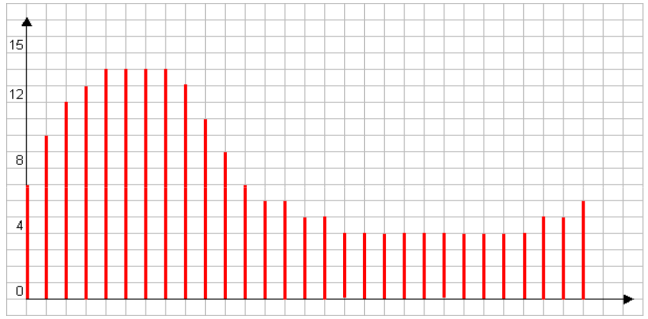
1. Le nombre de voies (appelées IT) est 2 Mbits/s /64 Kbits/s = 32 voies
2. Il suffit de prendre 3 canaux (3 IT) de la trame MIC.

Exercice VI

- **Dans le cadre de l'échantillonnage de données analogiques, on peut utiliser le codage ordinaire PCM (Pulse Code Modulation) qui consiste à coder sur n bits chaque valeur mesurée de la donnée (avec approximation de quantification : on va au plus près par exemple).**

1. **Soit la donnée analogique suivante que l'on désire coder sur 4 bits (les lignes verticales indiquent les instants d'échantillonnage). En déduire le fichier binaire correspondant.**

Correction Exercice VI



- le codage de la donnée analogique (chaque mesure sur 4 bits)

0111 1010 1100 1101 1110 1110 1110 1110
1101 1011 1001 0111 0110 0110 0101 0101
0100 0100 0100 0100 0100 0100 0100 0100
0100 0100 0101 0101 0110

Exercice VII

- **On veut transmettre un message sur une ligne téléphonique. Parmi les trois transformations suivantes et après avoir rappelé la technique utilisée, ses avantages et ses inconvénients, quelle est celle qui vous semble la plus adaptée ?**
  - **a- NRZ (No Return to Zero)**
  - **b- Biphase**
  - **c- Modulation en fréquence**

Correction Exercice VII

- **Dans l'exercice il s'agit d'une ligne analogique.**
  Par conséquence, les deux premiers codages qui sont des codages en bande de base sont à écarter et le troisième codage est le plus adapté.

- **Le codage NRZ (No Return To Zero) code les bits 1 et 0 avec deux tensions +V et -V. C'est un codage simple et qui évite le retour à 0 volts. Toutefois il est sensible aux désynchronisations.**

- **Le codage biphase (appelé aussi Manchester) code chaque bit avec deux états générant un front descendant pour le bit 1 et un front montant pour le bit 0. La synchronisation est très bonne**

- **La modulation en fréquence utilise deux fréquences pour représenter les bits 1 et 0. Son avantage est l'adaptation au support de transmission**

Exercice VIII

- **Considérons un signal audio dont le spectre de fréquence s'étend entre 300 et 3000 Hz. Supposons qu'un échantillonnage à 7 kHz est utilisé pour générer un signal MIC.**

1. **Le signal est-il suréchantillonné ou sous-échantillonné ?**

Correction Exercice VIII

- 1. Le signal est suréchantillonné. En effet, pour générer un signal MIC, il faut échantillonner à 2 fois la fréquence maximale (Shannon) donc à 6 kHz (=2*3000).

Exercice IX

- **Exprimer le taux de perte de paquets si**
  - on a un taux d'erreur sur un bit de10^{-13}
  - dans un réseau transportant des paquets de 125 octets

Correction Exercice IX

- **Un taux d'erreur sur un bit de 10^{-13}.**
  - un bit sur 10^{13} est endommage.
  - un paquet de 125x8 = 1000 bits sur 10^{10} est endommage.

Exercice X

- Soit un canal satellite dont le délai de propagation est de 250 ms. Le temps de réaction des machines interconnectées est de 2 ms. Le passage du signal dans les modems (Dig-Mod-Ana-Mod-Dig) introduit un délai supplémentaire de 10 ms.

- Des blocs de données de 240 caractères ASCII sont transmis ; les acquits de ces blocs font 6 caractères. Le temps de réaction de l'émetteur lors de la réception du dernier acquit est compté.

1. Déterminez l'efficacité du canal satellite si la ligne est half-duplex à 4800 bps.

2. Si la vitesse de transmission de la ligne est doublée, quelles sont les conséquences pour l'efficacité ?

Correction Exercice X

- T_{msg} = (240 *8) /4800 = 400 ms.
  - T_{ack} = (6 *8) /4800 = 10 ms.
  - Délais = 2 (modem + réaction + Tp) = 524 ms.
  - Total = 400 + 10 +524 = 934ms
  - Efficacité = 400/934 = 42.8%.

	4800bps	9600bps
T_{msg}	400	200
T_{ack}	10	5
Délais	524	524
Total	923	729
Efficacité	42.8%.	27.4%

PARTIE II: TECHNIQUES DE DÉTECTION DE CORRECTION DES ERREURS DE TRANSMISSIONS

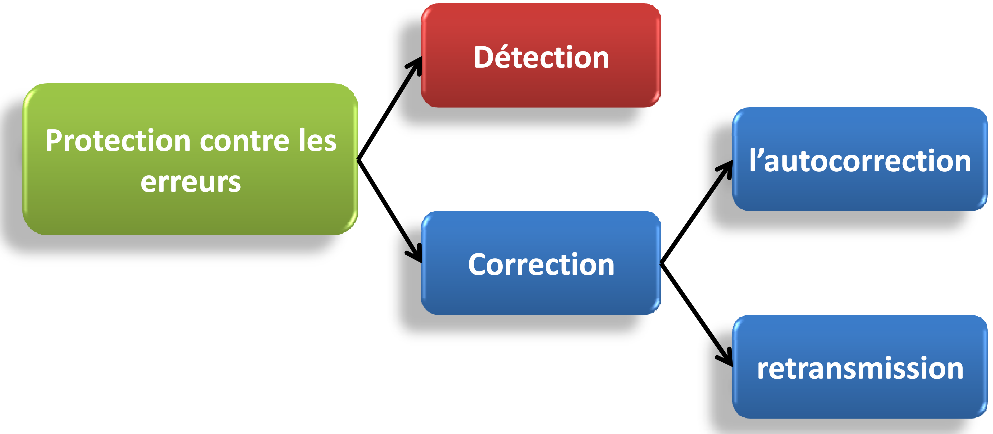
Problématique

Comment B peut <u>détecter</u> l'occurrence d'une erreur?

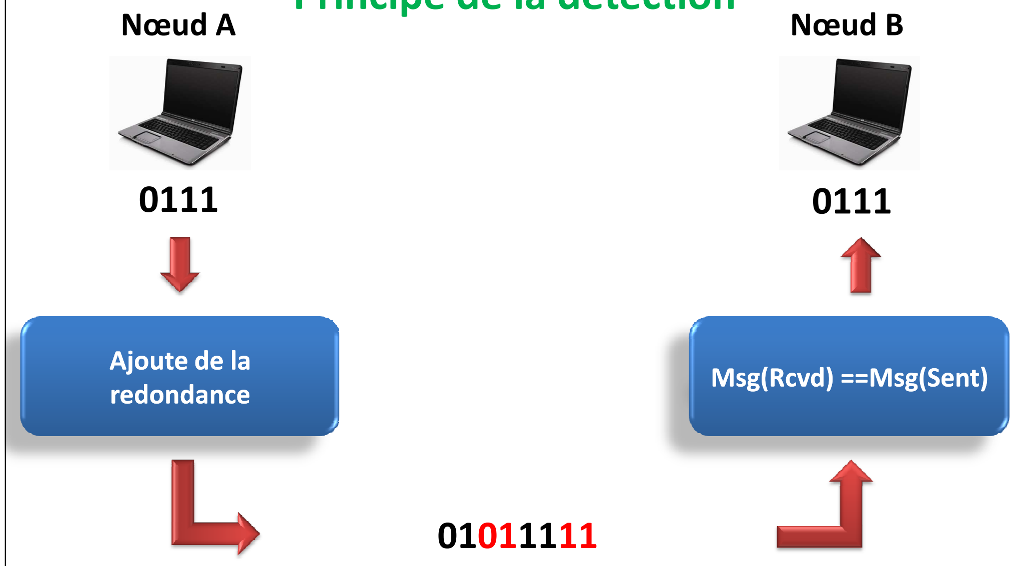
Comment B peut <u>localiser</u> une erreur ?

Comment B peut <u>corriger</u> une erreur ?

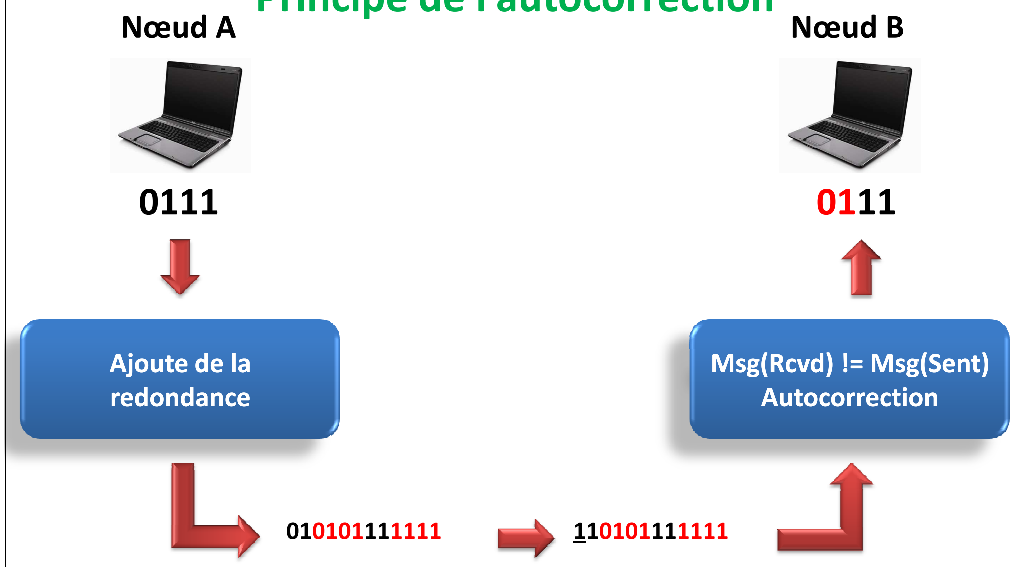
Problématique



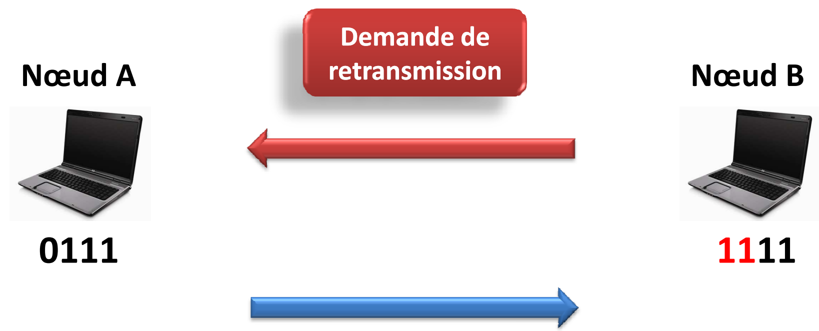
Problématique
Principe de la détection



Problématique
Principe de l'autocorrection



Problématique
Principe de la correction par retransmission



Problématique
Approche Naïve: La répétition

- **Détection d'erreurs**
  - Le message envoyé est constitué du double du message initial.
  - Envoyer **10010011001001** au lieu de **1001001**
  - Le récepteur détecte une erreur si les exemplaires ne sont pas identiques.

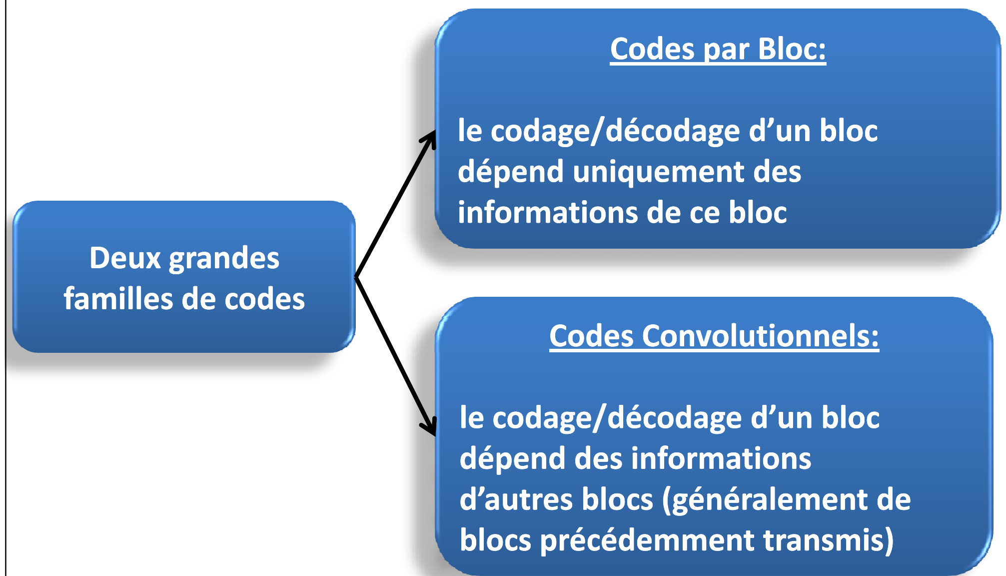
- **Autocorrection**
  - Le message envoyé est constitué du triple du message initial.
  - Envoyer **100100110010011001001** au lieu de **1001001**
  - Le message correcte correspond aux 2 exemples identiques.

Problématique
Approche Naïve: La répétition

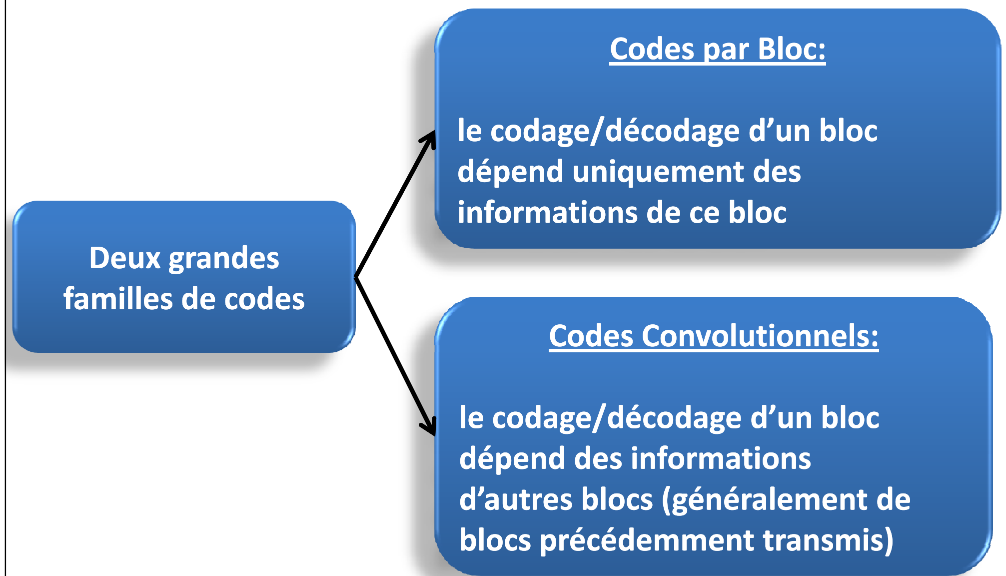
- **La détection et la correction des erreurs nécessitent d'introduire de la redondance dans les messages transmis.**
- **Certaines erreurs ne peuvent pas être détectées**
  - Exemple : la même erreur sur les deux exemplaires
- **Certaines erreurs détectées ne peuvent pas être corrigées**
  - Exemple : Une erreur différente sur au moins deux exemplaires
- **Certaines erreurs sont mal corrigées**
  - une même erreur sur deux exemplaires simultanément

➡ **L'autocorrection nécessite plus de redondance que la simple détection**

Classification des codes



Codes par Bloc



Définition

- **Un code (k, n) transforme (code)**
  - tout bloc initial de ***k bits* d'information** en un bloc **codé de n bits**
  - le code introduit une **redondance** puisque **n > k.**

- **Le code est systématique**
  - si les **k premiers bits du bloc** codé **sont égaux** aux **bits du bloc initial**.
  - Alors **les r (r=n-k) derniers bits** forment un **champ de contrôle d'erreur.**

- **Le rendement d'un code (k, n) est R = k/n**

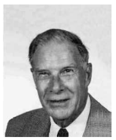
Définition

- **On appelle mot du code, la suite de n bits obtenue après un codage (k, n).**
  - Le **nombre n** de bits qui composent un mot du code est appelé **la longueur du code**.
  - La **dimension k** étant la **longueur initiale des mots**.

- **Le poids de Hamming d'un mot est le nombre de bits à 1 qu'il contient.**

Définition
La distance de Hamming

- **À deux suites de symboles de même longueur, elle associe l'entier désignant le cardinal de l'ensemble des symboles de la première suite qui différent de la deuxième.**
  - La distance de Hamming entre **1011101** et **1001001** est 2 **(0 + 0 + 1 + 0 + 1 + 0 + 0 = 2)**



Richard W. Hamming
USA 1915-1998

Définition
Capacité de détection

- **La capacité de détection d'un code**
  - est définie par les configurations erronées qu'il est capable de détecter
  - Une erreur simple (resp. double, ou d'ordre p) affecte une seule (resp. 2, ou p) position(s) binaire(s) d'un mot.

- **Pour qu'un code ait une capacité de détection des erreurs d'ordre e,**
  - il faut que sa distance de Hamming soit supérieure à 1+e
  - Exemple : distance =3 → capacité de détection ≤ 2

Définition
Capacité de correction

- **La capacité de correction d'un code**
  – est définie par les configurations erronées qu'il est capable de corriger

- **Pour qu'un code ait une capacité de correction des erreurs d'ordre e,**
  – il faut que sa distance de Hamming soit supérieure à 1 + 2e.
  – Exemple: distance =3 → capacité de correction ≤ 1

Le contrôle de parité

- **Parité paire (impaire) :** le poids de Hamming des mots du code est paire (impaire)
  – Le poids de Hamming d'un mot est le nombre de bits à 1 qu'il contient

- C'est un code **systématique (k, k+1)** dans lequel **un bit** (le bit de parité) est ajouté au mot initial pour assurer la parité.

- Son **rendement** est **faible** lorsque **k** est **petit**.

- **Pour une parité paire (impair), on protège une séquence de k bits par l'ajout d'un bit de sorte que le nombre de bits ayant la valeur 1 soit pair (impair)**

Le contrôle de parité

Lettre	Code ASCII	Mot Codé (Parité Paire)	Mot Codé (Parité Impaire)
A	01000001	010000010	010000011
C	01000011	010000111	010000110
T	01010100	010101001	010101000

•Ce code est capable de détecter toutes les erreurs en nombre impair. Il ne détecte pas les erreurs en nombre pair.

Parité longitudinale et transversale (LRC : Longitudinal Redundancy Check)

- **Le bloc de données est disposé sous une forme matricielle (k=a.b).**
- **On applique la parité (uniquement paire) sur chaque ligne et chaque colonne.**
- **On obtient une matrice (a+1, b+1).**
- **Le rendement est très faible : a.b/ (a+1).(b+1).**

	1	0	1	0	0	0	1	1
	0	1	1	0	1	0	1	0
	1	0	0	0	0	0	1	0
LRC	0	1	0	0	1	0	1	1

Exemple

Lettre	Code ASCII (sur 7 bits)							Bit de parité
H	1	0	0	1	0	0	0	0
E	1	0	0	0	1	0	1	1
L	1	0	0	1	1	0	0	1
L	1	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	1	1
Bit de parité	1	0	0	0	0	1	0	0

Parité longitudinale et transversale

- **Capacité de détection et d'autocorrection**
  - **Principe :** Une erreur simple modifie simultanément la parité d'un ligne et d'une colonne.
  - **Correction :** inverser le bit situé à l'intersection de la ligne et de la colonne ayant une parité incorrecte.

1	0	1	0	0	0	1	1
0	1	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	1

Les codes linéaires
Définition

- **Les codes linéaires sont des codes**
  - dont chaque **mot** du code (**noté c**)
  - est obtenu après **transformation linéaire** des bits du mot initial (**noté i**).
- **Ces codes sont caractérisés par leur matrice $G_{(k, n)}$ (appelée matrice génératrice) telle que : i . G = c**
- **Soit 'C' un code linéaire [n,k] et soit la base de C.**
  - Une **matrice génératrice** de C est donc une matrice dont les **colonnes** sont formées par les **vecteurs de la base**.
  - 'C' est un sous-espace vectoriel de **$(Z/2Z)^n$ (entiers modulo2)**

Les codes linéaires
Exemple

- **Exemple d' i.G = c**

i:

1	0	1

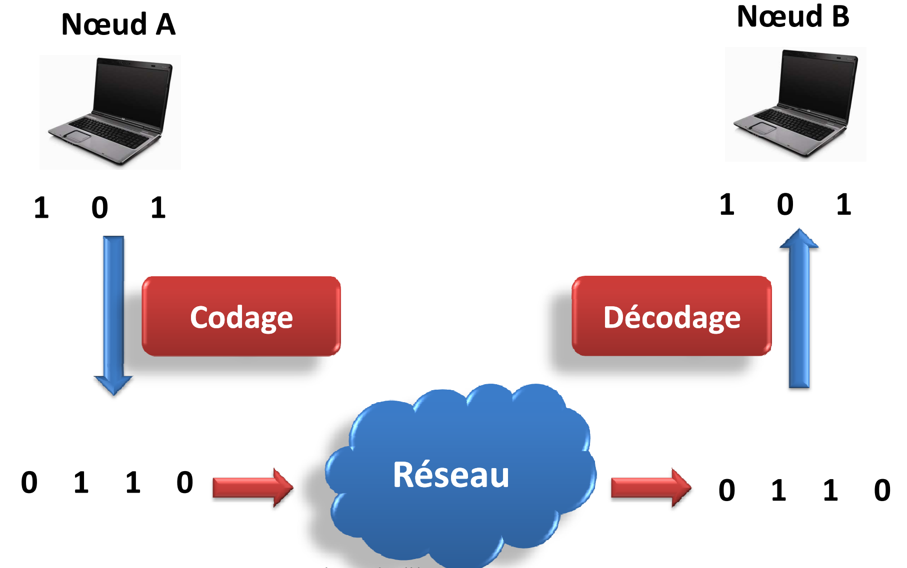
G:

1	0	1	1
0	1	0	1
1	1	0	1

c:

0	1	1	0

Les codes linéaires
Exemple



Les codes linéaires
matrice de contrôle et décodage par syndrome

- La matrice $\mathbf{H}_{(n-k,\, n)}$ (appelée **matrice de contrôle**) permet de savoir si un **mot reçu** est un **mot du code**, en calculant son **syndrome**
  - L'équation $\mathbf{G \cdot H^T = 0}$ définit la relation entre les deux matrices

∈

- **Si le syndrome du mot est nul, ce mot appartient au code**

- **Syndrome du mot reçu c' :**

  $$c' . H^T = 0_{(n-k)} \leftrightarrow c' \in C_{(k,\, n)}$$

Les codes linéaires systémique

- Un **codage linéaire est systémique** si et seulement si la **matrice génératrice G** correspond à la **juxtaposition** de la **matrice Identité I_p** et d'une **matrice de parité P** appartenant à $\mathbf{M_{p,n-p}(Z/2Z)} \rightarrow \mathbf{G = (I_p : P)}$

- **Exemple**
  - G(3,4) par bit de parité :

G =

1	0	0	1
0	1	0	1
0	0	1	1

P =

1
1
1

Code de Hamming

- **Permet de détecter et corriger une erreur et seulement une erreur**
  - Ce procédé est donc valable pour des taux d'erreurs faibles

- **On va découper l'information par tranche de N bits et on va rajouter t bits**
  - **t** sera le **plus petit** entier tel que $\mathbf{2^t - 1 \geq N + t}$.
  - On aura donc **au total N+t bits**.

Code de Hamming

- **Les bits rajoutés ne seront pas mis à la fin mais seront entrelacés avec la donnée initiale.**
  - Ainsi les **N+t bits** de la donnée finale seront notés $\mathbf{f_{N+t}\ f_{N+t-1}\ f_{N+t-2} \dots f_2 f_1}$.
  - Les **t** bits **rajoutés**, appelés **bits de contrôle**, seront ceux dont l'**indice** est une **puissance de 2**.
  - Il y en a exactement **t**.

Exemple de Code de Hamming

- **La donnée initiale est 0110 1110**
- **N vaut donc 8.**
  - On cherche la plus petite valeur de t vérifiant $2^t - 1 \geq 8 + t$.
  - On trouve **t=4**.
  - Il y a au total 12 bits.
- **Les bits contrôle sont f_1, f_2, f_4 et f_8.**

Exemple de Code de Hamming

- **Les bits qui ne sont pas des bits de contrôle s'obtiennent très facilement : il suffit de reporter la donnée initiale**

f_{12}	f_{11}	f_{10}	f_9	f_8	f_7	f_6	f_5	f_4	f_3	f_2	f_1
0	1	1	0		1	1	1		0		

- **Il nous reste donc à trouver la valeur des bits de contrôle.**
  - Pour les trouver nous allons former des ensembles de bits.
  - Pour trouver les ensembles de bits il faut au préalable écrire les entiers de **1 à N+t** en base 2 **sur t bits.**

Exemple de Code de Hamming

- **Sur notre exemple, N vaut 8 et t vaut 4 il faut donc écrire les entiers de 1 à 12 en base 2 sur 4 bits.**
  - 0001 ===> 1
  - 0010 ===> 2
  - 0011 ===> 3
  - 0100 ===> 4
  - 0101 ===> 5
  - 0110 ===> 6
  - 0111 ===> 7
  - 1000 ===> 8
  - 1001 ===> 9
  - 1010 ===> 10
  - 1011 ===> 11
  - 1100 ===> 12

Exemple de Code de Hamming

i = rang du bit, j = numéro de ligne

J \ I	3	2	1	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0

Exemple de Code de Hamming

- **Nous allons maintenant construire t ensembles de bits notés E_1, E_2 ... E_t.**
- **Pour construire E_i, on regarde la colonne i à partir de la droite.**
  - S'il y a un **1** dans **colonne i** sur la **ligne j** alors le **bit f_j appartiendra à l'ensemble E_i.**
- **Dans notre exemple, pour construire E $_1$, nous allons regarder la colonne la plus à droite on trouve un 1 sur les lignes 1, 3, 5, 7, 9 et 11.**
  - On trouve donc : **$E_1 = \{ f_1, f_3, f_5, f_7, f_9, f_{11} \}$**
  - De la même manière, on trouve :
  - **$E_2 = \{ f_2, f_3, f_6, f_7, f_{10}, f_{11} \}$**
  - **$E_3 = \{ f_4, f_5, f_6, f_7, f_{12} \}$**
  - **$E_4 = \{ f_8, f_9, f_{10}, f_{11}, f_{12}\}$**

Exemple de Code de Hamming

- **Nous allons maintenant reporter dans chaque ensemble les valeurs que nous avions trouvées :**
  - **f_{12}=0**
  - **f_{11}=1**
  - **f_{10}=1**
  - **f_9=0**
  - **f_7=1**
  - **f_6=1**
  - **f_5=1**
  - **f_3=0**
- **On obtient :**
  - **$E_1 = \{ f_1, 0, 1, 1, 0, 1\}$**
  - **$E_2 = \{ f_2, 0, 1, 1, 1, 1 \}$**
  - **$E_3 = \{ f_4, 1, 1, 1, 0 \}$**
  - **$E_4 = \{ f_8, 0, 1, 1, 0\}$**

Exemple de Code de Hamming

- **On s'aperçoit que dans chaque ensemble il y a un et un seul bit inconnu.**
  - Nous allons déterminer ce bit de manière à ce que dans chaque **ensemble de bits le nombre de bits à 1 soit pair**.
- On trouve donc :
  - **f_1=1**
  - **f_2=0**
  - **f_4=1**
  - **f_8=0**

f_{12}	f_{11}	f_{10}	f_9	f_8	f_7	f_6	f_5	f_4	f_3	f_2	f_1
0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1

Exemple de Code de Hamming

- **Lorsqu'on récupère une donnée obtenue grâce au codage de Hamming, deux questions naturelles vont se poser** :
  - la donnée a-t-elle été altéré ?
  - si oui, quelle est la correction proposée par le code de Hamming ?

- **La méthode pour répondre à ces deux questions est la suivante :**
  1. construire **les t ensembles de bits E_i.**
  2. calculer t bits selon la règle suivante
     1. **e_i=0** si le nombre de bits à **1** dans E_i est **pair**
     2. sinon **e_i=1**.
     3. Si **aucune erreur** ne s'est produite tous les bits **e_i doivent être nuls**.
  3. calculer **E=(e_t ...e_1) en base de 2**.
  4. Si **E est nul** alors on en déduit qu'il **n'y a pas eu d'erreur**.
  5. si **E n'est pas nul**, une erreur s'est produite et le code de Hamming
  6. propose la **correction** suivante : inverser **la valeur du bit f_E**.
  7. on récupère ensuite aisément la valeur de la donnée initiale en supprimant les bits de contrôle.

Exemple de Code de Hamming

- On récupère la donnée **0111 0111 1001**, le bit en rouge signalant l'erreur. On a donc :

f_{12}	f_{11}	f_{10}	f_9	f_8	f_7	f_6	f_5	f_4	f_3	f_2	f_1
0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1

- On construit les ensembles de bits :
  - E_1 = { f_1 , f_3, f_5, f_7 , f_9, f_{11} } ={ 1 , 0, 1, 1, 1, 1} ==> le nombre de 1 (5) est impair ==> e_1=1
  - E_2 = { f_2 , f_3, f_6, f_7 , f_{10}, f_{11} } = { 0 ,0 , 1, 1, 1, 1 } ==> le nombre de 1 (4) est pair ==> e_2=0
  - E_3 = { f_4 , f_5, f_6, f_7 , f_{12} } = { 1 ,1 , 1, 1 , 0 } ==> le nombre de 1 (4) est pair ==> e_3=0
  - E_4 = { f_8 , f_9, f_{10}, f_{11} , f_{12}} ={ 0 ,1 , 1, 1, 0} ==> le nombre de 1 (5) est impair ==> e_4=1

Exemple de Code de Hamming

- **E s'écrit donc en base 2 ($e_4e_3e_2e_1$) soit (1001).**
  - E vaut donc 9.
  - Il y a donc eu une erreur

- **la correction propose d'inverser la valeur de bit f_9.**
  - f_9 valait 1 : nous allons donc changer sa valeur en 0.

- **La donnée corrigée est donc :**

f_{12}	f_{11}	f_{10}	f_9	f_8	f_7	f_6	f_5	f_4	f_3	f_2	f_1
0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1

- **En enlevant les bits f_8, f_4, f_2 et f_1, on obtient donc la donnée initiale après correction soit 0110 1110**

Codage de Hamming

- **Ce codage est intéressants mais n'est pas adaptés à toutes les situations**
  - lorsqu'il n'y a que peu d'erreurs et que ces erreurs sont isolées, ce code peut être intéressant.

- **Mais dès qu'il y a un grand nombre d'erreurs et que ces erreurs arrivent groupées, alors ce codage devient de moins en moins performant.**

- **On s'aperçoit ainsi que l'efficacité d'un mécanisme de détection d'erreurs dépend en fait des hypothèses sur la répartition statistique des erreurs.**

Les codes cycliques ou détection par clé calculée

- **Dans la détection par clé calculée, l'information redondante, la clé (CRC, Cyclic Redundancy Check), est déterminée par une opération mathématique complexe appliquée au bloc de données à transmettre et transmise avec celui-ci**

Données : suite de bits quelconque.	Clé ou CRC ou FCS
Bloc ou TRAME à Transmettre	

Les codes cycliques ou détection par clé calculée

- **La méthode de contrôle par clé calculée considère le bloc de N bits à transmettre comme un polynôme de degré N−1 : P(x).**
- **Ce polynôme est divisé par un autre, dit polynôme générateur G(x) selon les règles de l'arithmétique booléenne ou arithmétique modulo 2.**
  - **Le reste de cette division R(x) constitue le CRC parfois appelé aussi FCS (Frame Check Sequence).**
- **Le CRC calculé est transmis à la suite du bloc de données. En réception, le destinataire effectue la même opération sur le bloc reçu.**
  - **Le CRC transmis et celui calculé par le récepteur sont comparés, si les valeurs diffèrent une erreur est signalée.**

Les codes cycliques ou détection par clé calculée

- **Un code polynômial est un code linéaire systématique dont chacun des mots du code est un multiple du polynôme générateur (noté g(x)).**
  - Le polynôme g(x) est connu à l'avance par l'émetteur et le récepteur.
- **A toute séquence de bits on associe un polynôme**
  - $U = <u_0, u_1, u_2, \dots, u_n>$ → $U(x) = u_0 + u_1.x + u_2.x^2 + \dots + u_n.x^n$
  - 1001001 → $X^6 + X^3 + 1$

Les codes polynômiaux
Procédure de codage

- **Soit P(X) le polynôme associé à la séquence de bits à protéger.**
- **Soit g(x) le polynôme générateur de degré k**
- **Les calculs sont faits dans le corps Z/2Z**
  - 1+1=0; X+X=0; X=-X

Addition

+	0	1
0	0	1
1	1	0

Soustraction

–	0	1
0	0	1
1	1	0

Multiplication

×	0	1
0	0	0
1	0	1

Les codes polynômiaux
Procédure de codage

- **On calcule $P'(X) = P(X).X^k$**
  - Ceci équivaut à un décalage de P(X), de k positions vers la gauche.
- **On divise P'(X) par g(x).**
  - **$P'(X)=Q(X).g(X)+R(X)$**
- **Le message envoyé est : $P'(X) + R(X)$**
  - **$P'(X)+R(X) = Q(X).g(X)$ est multiple de g(X)**

Les codes polynômiaux
Procédure de décodage

- **Soit M(X) le message reçu.**
  - On divise M(X) par g(X)
- Si le reste de division est **non nul alors**
  - **détection** d'une erreur.
- Sinon (**reste de division nul**)
  - il y a une forte probabilité que la transmission est correcte

Les codes polynômiaux
Exemple

- **Soit la séquence 1101 à envoyer**
  - $g(x) = x^3+x+1$
  - $P(x)=x^3+x^2+1$
- **$P'(x)=P(x).x^3=x^6+x^5+x^3$**
- **$R(X) =1$**
- **Message envoyé: $P'(X) + R(X) =$ 1101001**

Les codes polynômiaux
Exemple

X^6	X^5	X^3					X^3	X	1
X^6	X^4	X^3				X^3	$+X^2$	$+X$	$+1$
	X^5	X^4							
	X^5	X^3	X^2						
	X^4	X^3	X^2						
	X^4	X^2	X						
		X^3	X						
		X^3	X	1					
				1	$=R(X)$				

Les codes polynômiaux

- **La qualité de la protection dépend du choix du polynôme générateur g(x)**
- **g(x) comporte au moins 2 termes alors les erreurs simples sont détectables**
- **g(x) a un facteur irréductible de trois termes alors les erreurs doubles sont détectables**
- **g(x) est multiple de x+1 alors les erreurs en nombre impair sont détectables**

Application

- **on désire protéger le message «110111» par une clé calculée à l'aide du polynôme générateur $x^2 + x + 1$.**
- **Donner la séquence de bit à envoyer ?**

Correction

- **Au message 110111, on fait correspondre le polynôme :** $x^5 + x^4 + 0x^3 + x^2 + x^1 + x^0$
- **Pour permettre l'addition de la clé au message, on multiplie le polynôme représentatif du message par x^m où m est le degré du polynôme générateur. Le dividende devient:**

$$(x^5 + x^4 + 0x^3 + x^2 + x^1 + 1).x^2 = x^7 + x^6 + 0x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 0 + 0$$

Correction

$$\begin{array}{cccccccc|l}
x^7 + & x^6 + & 0 + & x^4 + & x^3 + & x^2 + & 0 + & 0 & x^2 + x + 1 \\ \cline{9-9}
x^7 & x^6 & x^5 & \downarrow & \downarrow & \downarrow & & & x^5\ x^3\ 1 \\
 & & x^5 & x^4 & x^3 & \downarrow & & & \\
 & & x^5 & x^4 & x^3 & \downarrow & & & \\
 & & & & & x^2 & 0 & 0 & \\
 & & & & & x^2 & x & 1 & \\
 & & \text{RESTE} \Rightarrow & & & & x & 1 &
\end{array}$$

Le reste de la division polynomiale est de degré inférieur à celui du diviseur, la division est terminée.

Correction

- **Le message envoyé est : P'(X) +R(X)**
  - **P'(X)+R(X) = Q(X).g(X) est multiple de g(X)**

- **P'(x) + R(x) = 11011111**

FIN