

Transmissions numériques pour les Télécommunications

Frédéric Sarry



Plan

- 1** Introduction
- 2** De l'analogique au numérique
- 3** La chaîne de transmission
numérique
- 4** Modulations numériques
- 5** Modulation en Bande de Base
- 6** Transmission sur onde porteuse
- 7** Modulation de fréquence
- 8** Les Codes correcteurs d'erreur

Contexte

But : échange d'**informations** à travers un **réseau** entre différents utilisateurs

- organisation des informations :
- transmission des informations :

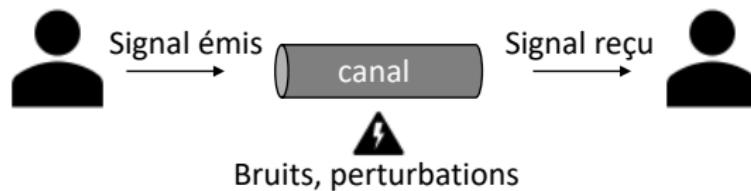


Fig. 1 – Processus de communication

Positionnement du cours dans le modèle OSI

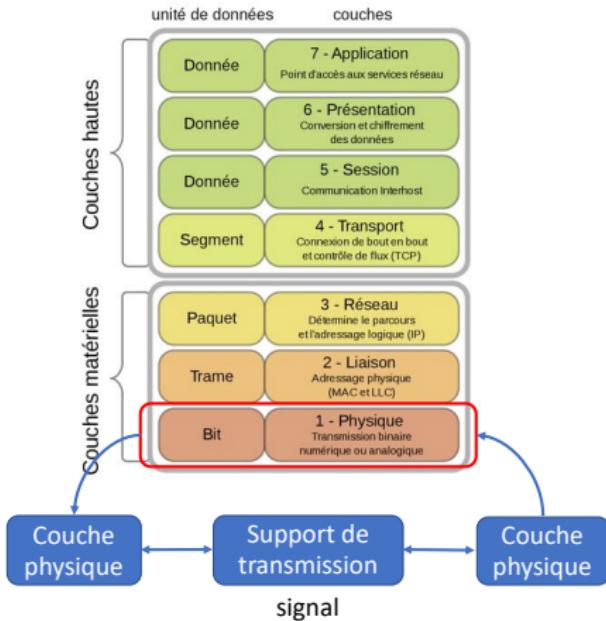
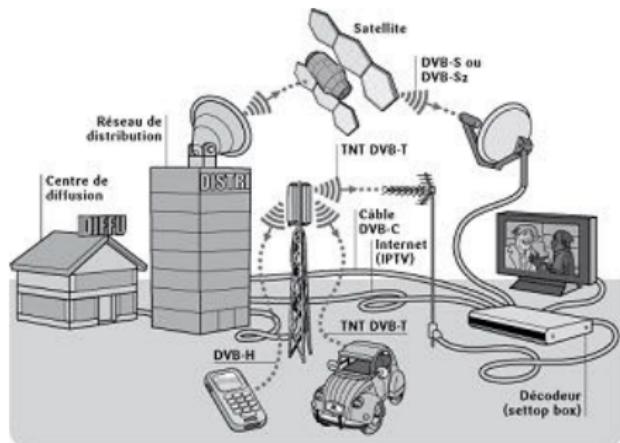


Fig. 2 – Open Systems Interconnection

Domaines d'applications



Objectifs du cours : *Introduction*

Base théorique de la transmission numérique permettant d'acheminer une source d'information "numérique" (ou numérisée) au travers d'un "support physique analogique" dans le cas élémentaire (canal à bruit blanc additif gaussien)

- introduction aux transmissions numériques ;
- chaîne de transmission ;
- transmission en Bande de Base ;
- transmission sur fréquence porteuse ;
- code correcteur ;
- ligne de transmission ;
- protocole de communications et bruit ;
- antenne ;
- *Contrôle.*

Objectifs du cours

Travaux pratiques

- asynchrone ;
- synchrone ;
- hertzien ;
- antenne ANSYS HFSS 1 ;
- antenne ANSYS HFSS 2.

Compétences

- Savoir appréhender un système de transmissions numériques ;
- Identifier les principes mis en œuvre ;
- Analyser physiquement et logiquement le type de transmissions utilisées ;

- Être capable d'écrire des programmes permettant de mettre en œuvre et d'utiliser des transmissions numériques.
- Analyser et évaluer les performances d'un système de transmissions numériques ;
- Choisir un système de transmission (support, codage, mode, ...) en fonction de l'application envisagée ;
- Assurer une veille technologique dans le domaine des transmissions.

Bibliographie

- B. Sklar and P. Kumar Ray - Digital Communications : fundamentals and Applications - Pearson Education, 2014 (ISBN 9788131720929)
- G.L. Stüber - Principles of Mobile Communication - Springer, 2017 (ISBN 9783319556147)
- M. Joindot, A. Glavieux - Introduction aux communications numériques - Dunod, 2007 (ISBN 9782100511345)
- D. Le Ruyet,M. Pischella - Bases de communications numérique (1 et 2) - ISTE Editions, 2015 (ISBN 9781784050948, ISBN 9781784050931)
- J. Vélu - Méthodes mathématiques pour l'informatique - Dunod, 2013(ISBN 9782100594528)
- P. Kadionik - Base de transmissions numériques : les modulations numériques - ENSEIRB
- E. Vourc'h - Communications numériques - ENS Cachan
- M. Coulon - Systèmes de télécommunications - ENSEEIHT
- L. Ros - Télécommunications numériques - Grenoble INP
- R. Weber - Transmission numérique - Polytech Orléans
- L. Alliès - M3106 - IUT Nancy Brabois



Qu'est ce qu'un message numérique ?

- suite d'éléments (M-aire) pouvant prendre une parmi M valeurs possibles ;
- l'ensemble des valeurs constitue un alphabet ;
- souvent binaire : 0, 1 ;
- chaque élément M-aire peut être transformé en un ensemble de p éléments binaires

avec $\lfloor \cdot \rfloor$ la partie entière par valeur inférieure

Code morse international

1. Un tiret est égal à trois points.
2. L'espacement entre deux éléments d'une même lettre est égal à un point.
3. L'espacement entre deux lettres est égal à trois points.
4. L'espacement entre deux mots est égal à sept points.

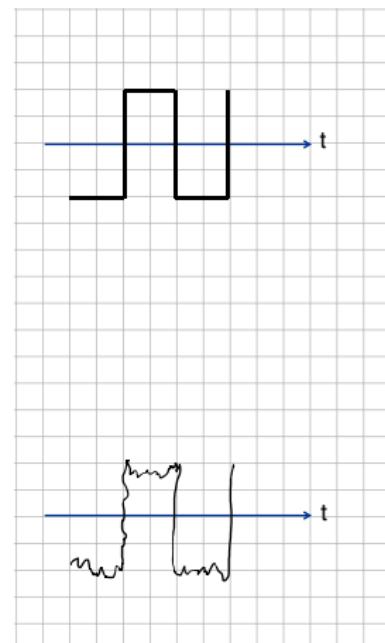
A	U
B	V
C	W
D	X
E	Y
F	Z
G	
H	
I	
J	
K	1
L	2
M	3
N	4
O	5
P	6
Q	7
R	8
S	9
T	0

Transmission numérique vs analogique

Transmission analogique



Transmission numérique



Transmission numérique vs analogique

Analogique

- Message :

- Critère de qualité :

Numérique

- Message :

- Critère de qualité :

Pourquoi le numérique ?

Les 

-
-
-
-
-
-
-
-

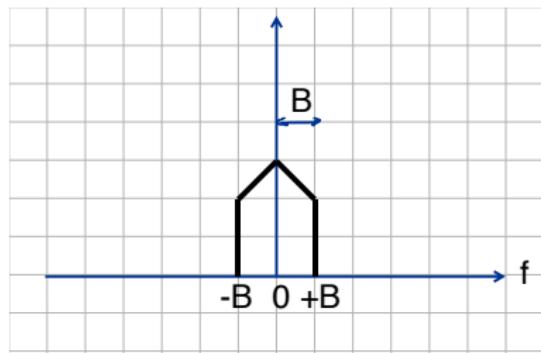
Les 

-
-
-

Adaptation du signal au canal

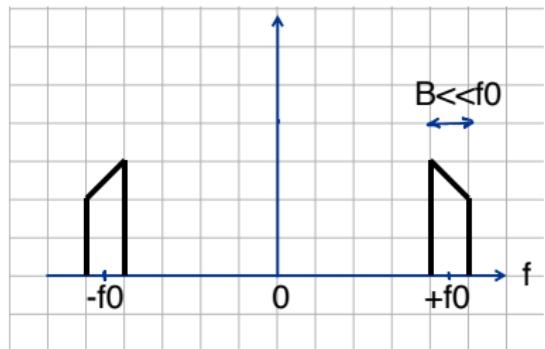
Transmission en Bande de Base (B.B.)

Signal transmis réel de type passe bas (spectre autour de 0 Hz)



Transmission sur fréquence porteuse f_0

Signal transmis réel de type passe bande (spectre autour de $\pm f_0$, nul en 0 Hz)



B = bande passante ou largeur de bande (mono latérale)

De l'analogique au numérique

Transformation d'un signal continu en numérique

- Echantillonner : discréteriser suivant la dimension "temporelle".
- Quantifier : discréteriser suivant la dimension "amplitude".

Échantillonnage

Quantification

Échantillonnage

L'échantillonnage consiste à transmettre un signal en capturant des valeurs à intervalles réguliers appelés période d'échantillonnage T_e . Il produit donc une suite de valeurs discrètes.

L'objectif de l'échantillonnage est la transmission de l'information codée dans un signal. La question du choix de la fréquence d'échantillonnage se pose immédiatement :

-
-

Pour choisir f_e , il faut déterminer la bande passante de l'information codée dans le signal à transmettre.

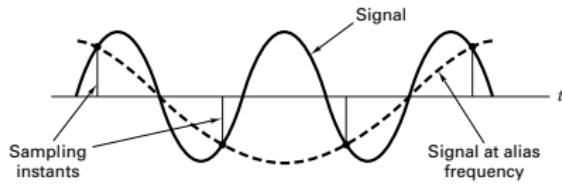
Échantillonnage

Exemple des signaux auditifs :

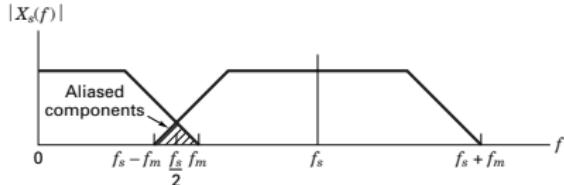
- Pour la transmission de la parole avec une intelligibilité suffisante (on comprend tous les mots), on estime qu'une bande passante de 160 Hz à 3 500 Hz est suffisante.
- Pour transmettre l'ensemble des signaux auditifs, y compris pour les personnes ayant l'ouïe la plus fine, on estime qu'une bande passante de 20 Hz à 20 000 Hz est suffisante.

Échantillonnage

Si on veut utiliser un signal échantillonné, il faut que l'ensemble des échantillons permettent de conserver la majeure partie de l'information du signal analogique d'origine.



Le repliement de spectre (Aliasing en anglais) est un phénomène qui introduit dans un signal des fréquences qui ne devraient pas s'y trouver, lorsque la fréquence porteuse ou la fréquence d'échantillonnage sont inférieures à deux fois la fréquence maximale contenue dans le signal.



Échantillonnage

Théorème de Shannon

Toutes les fréquences du signal dont la différence avec un multiple de f_e est égale sont codées identiquement et impossibles à distinguer.

Échantillonnage

Pour échantillonner efficacement, il faudrait donc :

-
-

Comme on ne peut pas limiter la bande passante rigoureusement (signal réel), mais seulement atténuer fortement à partir d'une certaine fréquence, on doit en réalité :

-
-
-

Quantification

En traitement du signal, la quantification est le procédé qui permet d'approcher un signal continu (ou à valeurs dans un ensemble discret de grande taille) par les valeurs d'un ensemble discret d'assez petite taille.

Quantification

La quantification est une opération destructrice d'information. Elle introduit une erreur (ou un bruit) entre le signal quantifié et le signal source. Cette erreur est généralement mesurée par la distance suivante :

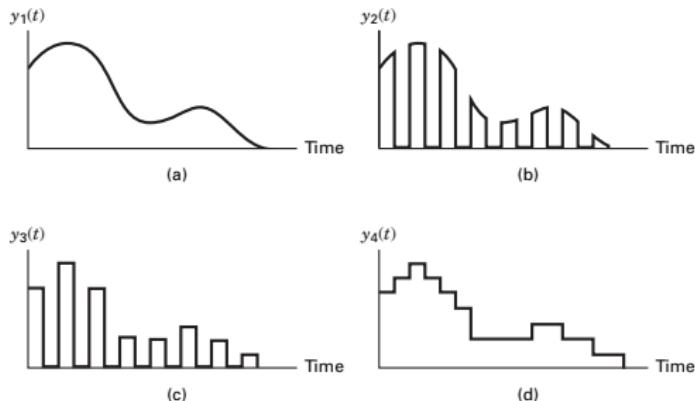


Fig. 3 – Amplitude and time coordinates of source data. (a) Original analog waveform. (b) Natural-sampled data. (c) Quantized samples. (d) Sample and hold

La chaîne de transmission numérique

Elle est constituée des éléments suivants :

- Données du problème : source de message, milieu de transmission et destinataire,
- Système de transmission : codage et décodage de source et de canal, émetteur et transmetteur

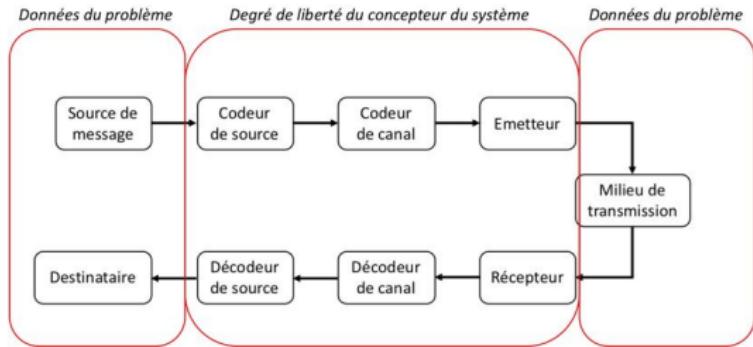


Fig. 4 – Principe d'une chaîne de transmission numérique

Description des éléments : *la source*

Elle peut être soit :

-
-
-

Exemple de sources :

-
-
-



Fig. 5 – Principe de la numérisation d'une source analogique

Description des éléments : *le codage de la source*

Le principe du codage de la source trouve ses fondements dans la théorie de l'information. Il en résulte :

-
-
-
-

Description des éléments : *le codage de la source*

La source codée est :

-
-
-
-

Si le temps entre 2 bits est constant (T_b) alors

Exemple : numérisation de la parole

1. Une bande audio comprend 2 voies (son stéréo) pour un signal échantillonné sur 8 bits à une fréquence de 22.5 kHz. Calculer le débit.

2. En téléphonie, la parole préalablement limitée à la bande [300-3400 Hz] est échantillonnée à la fréquence de 8 kHz sur des codes de 8 bits. Calculer le débit.

Exemple : le codage sans perte

Idée : faire intervenir la statistique des couleurs des pixels à différents ordres :

- Ordre 0 : couleur indépendante du voisin ;
- Ordre 1 : statistique des couleurs de 2 pixels voisins ;
- Ordre n : statistique des couleurs de $n+1$ pixels voisins



1. Une couleur de forte probabilité P_i (ex : bleu) contient peu d'information
Une couleur de faible probabilité (ex : vert), donc rare, contient beaucoup d'information
L'entropie représente le nombre moyen de bits nécessaire pour coder la source :
2. Une couleur de forte probabilité (ex : bleu) est codée avec peu de bits
Une couleur de faible probabilité (ex : vert) est codée avec plus de bits
La longueur moyenne de codage est donnée par :



Exemple : le codage sans perte

La statistique de l'image donne le résultat suivant :

Symbol	■	■	■	■	■	■
Probabilité	0,5	0,15	0,17	0,08	0,06	0,04

Un codage de Huffman donnerait le résultat suivant :

Symbol	■	■	■	■	■	■
Code	0	100	101	110	1110	1111

Quel serait le message généré pour transmettre ■■■■■■ ?

Quelles sont les couleurs transmises si je reçois 1110110101100000 ?

Que se passe-t-il si un des bits est erroné ?

Quel serait le nombre de bits par pixel nécessaire pour coder directement 6 couleurs ?

Quelle est l'entropie de la source ?

Quel est la longueur moyenne de codage ?

Exemple : le codage avec pertes

La source subit une transformation qui répartit l'information :

1. Filtrage pour extraire des paramètres représentatif de la source ;
2. Quantification des ces paramètres (donc pertes) ;
3. Transmission des paramètres quantifiés ;
4. Reconstruction la source à partir des paramètres quantifiés par le biais d'un modèle inverse de 1)

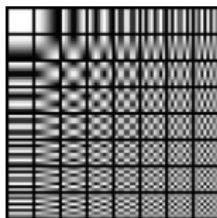


Fig. 6 – Transformation en cosinus (DCT)
pour les images



Fig. 7 – Codage JPEG (5ko)



Description des éléments : *le codage de canal*

- Le codage de canal est encore appelé codage
 - Il n'existe pas en
 - Il correspond à un ajout d'éléments binaires dit
 - Il engendre une du débit binaire.
 - La fonction de codage accroît

Description des éléments : l'émetteur I

- Le message numérique est une suite d'éléments binaires et
- Il est associé

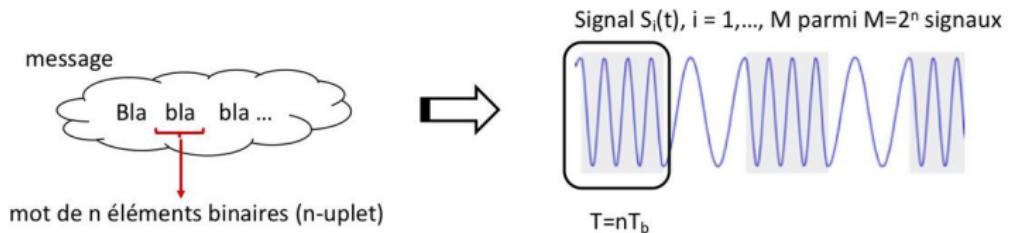


Fig. 8 – Illustration de l'opération de modulation

Description des éléments : l'émetteur II

- Rapidité de modulation :

Pour une transmission M-aire, il s'exprime :

- Choix de $S_i(t)$ dépend du milieu de transmission donc adaptation du signal modulé.
- Exemple d'adaptation : filtrage pour limiter la bande, centrer le signal modulé autour d'une fréquence f_0 intermédiaire

Description des éléments : *le canal de transmission* I

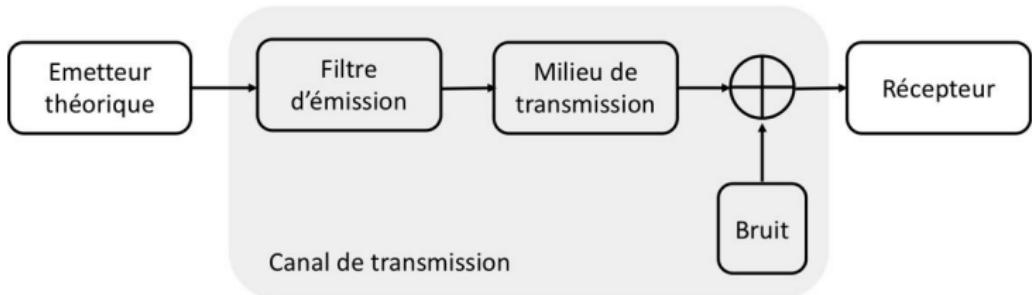


Fig. 9 – Le canal de transmission

- Définition différente selon que l'on étudie la propagation, la théorie de l'information, la théorie des communications.
- En théorie des communications, il inclut le milieu de transmission, le bruit mais aussi les antennes d'émission, de réception lorsqu'on travaille en espace libre.

Description des éléments : *le canal de transmission II*

- Le milieu de transmission est constitué par :

- Le bruit est constitué d'un bruit externe (milieu de transmission) et d'un bruit interne (dispositifs électroniques utilisés dans le récepteur).
 - Le bruit externe : rayonnement, interférences ou origine industrielle ;
 - Le bruit interne : composants passifs (bruit thermique, lié à la température), composants actifs (bruit de grenaille, lié au courant).
 - Ce sont des bruits
 - Le bruit interne est prépondérant.
 - Décrit par une source unique
 - La densité spectrale de puissance bilatérale uniforme :

T_i et T_e sont respectivement les températures de bruit à l'entrée du récepteur et de la source externe ; $k_B = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

- Le récepteur est caractérisé par son facteur de bruit F et donc

Description des éléments : *le canal de transmission III*

- La densité spectrale de puissance est $k_B T_0$ et correspond à une puissance de -114 dBm pour une bande de 1 MHz correspondant à $10^{-11,4}$ mW
 - Puissance de bruit recueillie pour une bande B (MHz) avec une température interne T_i vaut :
-
- Bruit blanc reste un modèle valable si la densité spectrale de puissance de bruit est **constante** dans une bande de fréquence supérieure à la bande occupée par le signal modulé (quasi toujours vérifié)

Quelques rappels sur le bruit I

En électronique, le bruit est un signal parasite caractéristique dont l'amplitude et la fréquence fluctuent aléatoirement et qu'on retrouve dans l'ensemble des circuits électroniques.

En fonction du circuit, le bruit généré par les composants électroniques peut fluctuer significativement. Il peut être produit par différents effets : le bruit de grenaille et le bruit thermique, par exemple, sont inhérents à quasiment l'ensemble des composantes tandis que les autres types de bruits dépendent essentiellement de la qualité des semi-conducteur.

■ Bruit blanc :

- processus aléatoire dans lequel la densité spectrale de puissance est la même pour l'ensemble des fréquences
- bruit blanc gaussien, c'est un bruit blanc qui suit une loi normale de moyenne et variance données.

■ Bruit de grenaille :

- encore appelé bruit de Schottky ou bruit quantique (en anglais, shot noise)

Quelques rappels sur le bruit II

- bruit électronique. Il est causé par le fait que le courant électrique n'est pas continu mais constitué de porteurs de charge élémentaires (en général des électrons).

■ Bruit thermique :

- appelé bruit de résistance, ou bruit Johnson ou bruit de Johnson-Nyquist
- bruit généré par l'agitation thermique des porteurs de charges, c'est-à-dire des électrons dans une résistance électrique en équilibre thermique
- phénomène indépendant de toute tension appliquée
- exprimée par la relation de Nyquist :

où σ^2 est la variance de la tension aux limites de la résistance, k_B est la constante de Boltzmann, qui vaut $k_B = 1,3806 \times 10^{-23} J.K^{-1}$, R est la résistance exprimée en ohms, et Δf , la bande passante reconnue.
Cette formule sert à prévoir le bruit minimum présent sur un dispositif électronique, et par conséquent sa limite de détection.

Description des éléments : *le récepteur*

- Il reconstitue le message émis
- Il est constitué d'amplificateur, de circuit de changement de fréquence, de démodulation (cas de transmission sur onde porteuse), de filtrage, d'échantillonnage et de prise de décision

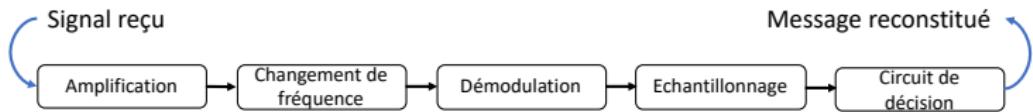


Fig. 10 – Le canal de transmission

Mesure de la qualité d'une transmission numérique I

- Fidélité de restitution des éléments binaires au destinataire ;
- Mesurée par la probabilité P_{eb} de prendre une décision erronée sur un élément binaire ;
- Valeur jamais strictement nulle mais suffisamment faible pour satisfaire des critères de fidélité (ex : 10^{-6} pour la parole en téléphonie)
Soit α_k l'élément binaire émis à kT_b , iid sur l'alphabet $\{0, 1\}$ alors

$$P_{eb} = \Pr\{\alpha_k = 1\} \cdot \Pr\{\hat{\alpha}_k = 0 \mid \alpha_k = 1\} + \Pr\{\alpha_k = 0\} \cdot \Pr\{\hat{\alpha}_k = 1 \mid \alpha_k = 0\}$$

où $\hat{\alpha}_k$ représente le résultat de la décision prise sur l'élément binaire α_k
Pour un bruit $B(t)$ stationnaire, la probabilité P_{eb} est indépendante de k .

Mesure de la qualité d'une transmission numérique II

- Mesure du taux d'erreur τ_{eb} :
⇒ bonne estimation de P_{eb}

cf brouillon formule taueb avec une probabilité P_{eb} si α_k mal codé
sinon.

avec X_k variable aléatoire qui suit une loi de Bernouilli de paramètre P_{eb}
Le taux d'erreur est une variable aléatoire caractérisée au second ordre
par sa moyenne m_T et sa variance σ^2_T

E : esperance ou estimateur

- * valeur que l'on s'attend à trouver
- * si il y a une densité de proba
- >moyenne pondérée de valeurs

—
cf brouillon formule m_T et σ^2_T

$\beta(\tau_{eb})$ est le biais de l'estimation ou l'erreur systématique

Mesure de la qualité d'une transmission numérique III

La variance mesure la précision de la mesure.

Une bonne estimation consisterait à avoir un biais nul et une variance faible.

Sachant que l'espérance de la variable X_k vaut $P_{eb}, \forall k$ alors

L'estimateur τ_{eb} est sans biais.

Si les erreurs de transmissions sont indépendantes, les X_k sont indépendantes et

L'erreur sur la mesure du taux d'erreur τ_{eb} par l'estimation de la probabilité d'erreur est évaluée par :

Il est ainsi possible de déterminer le nombre d'éléments binaires N et donc la durée pour mesurer un taux d'erreur avec une erreur de mesure ε donnée.



Exemple

On veut $P_{eb} = 10^{-6}$ avec une erreur inférieure à 10% ($\varepsilon^2 < 10^{-2}$)
 ⇒ mesurer le τ_{eb} à partir de partir de 10^8 éléments binaires

Pour un débit de $100 Mbits \cdot s^{-1}$ ⇒ durée = 1 seconde

Pour un débit de $1 kbits \cdot s^{-1}$ ⇒ durée = 10^5 seconde soit plus d'un jour

Sachant que $\mathbf{E}[\tau_{eb}] = P_{eb}$ et que $\varepsilon^2 \approx \frac{1}{NP_{eb}}$ alors $\mathbf{E}[n] \approx \frac{1}{\varepsilon^2}$
 ⇒ si on veut mesurer une erreur inférieure à 10%, il faut en moyenne $n = 100$ erreurs.

Généralités sur les signaux numériques

Objectif : associer à des données numériques un signal physique adapté au canal de transmission

2 types de transmission

1. **Transmission en bande de base :**



2. **Transmission sur fréquence porteuse :**



Critères de choix d'une modulation

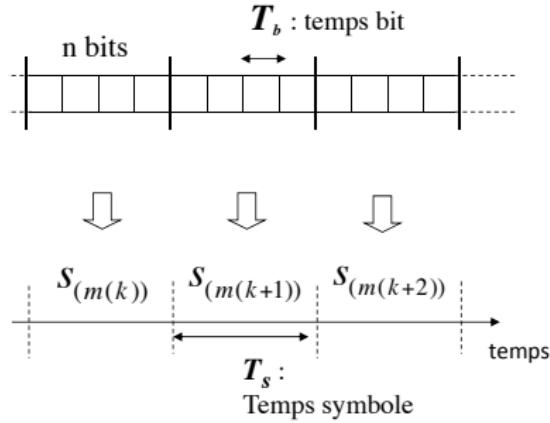
-
-
-
-
-

⇒ compromis à trouver entre simplification des équipements et performances
(ex : pour le GSM, modulation GMSK à enveloppe constante ; pour EDGE, modulation à enveloppe non-constante)

Code en ligne : en général

Séquencement pour une modulation de taille M : émission d' 1 signal parmi M possibles par intervalle de temps T_s en correspondance à 1 groupe de n bits.

Le nombre **M** d'états de l'alphabet de transmission se nomme la





Code en ligne : approche mathématique

En sortie du codeur en ligne :

- $M = 2^n$ mot de n bits $\Leftrightarrow M$ signaux possibles
 \Rightarrow dictionnaire de M signaux support de
 avec $T_s = nT_b$
 choix des signaux et affectation bits/signal (mapping) dépend de la modulation
 - 1 nouveau signal est émis (décalé) au temps kT_s où $k \in \mathbb{Z}$ (indice temporel) :
 - Le signal choisi pour l'instant k sera noté à la place de
 - Après filtrage, s'exprime aussi à partir du dictionnaire de M

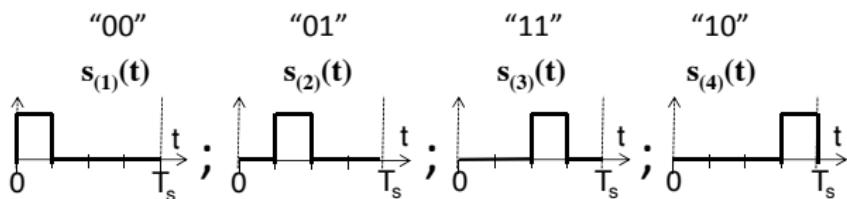
Code en ligne : exemple

Pulse-Position Modulation (M-PPM)

Largeur d'impulsion constante T_s/M et M positions possible durant T_s

Exemple :

$M = 4$, $n = 2$ bits



applications à puissance moyenne limitée mais très large-bande (si M augmente)

Exemples d'utilisation : communications optiques, communication sans fil ultra large-bande entre objets proches (capteurs à faible puissance)



Code en ligne PAM : approche mathématique

Pulse Amplitude Modulation (PAM) ⇔ MIA (Modulation d'Impulsion en Amplitude (MIA))

- Dictionnaire de M signaux construit à partir :
 - d'un signal élémentaire unique
 - et de M amplitudes $a(m)$ issues d'un alphabet réel
 - Signal en sortie du codeur en ligne :

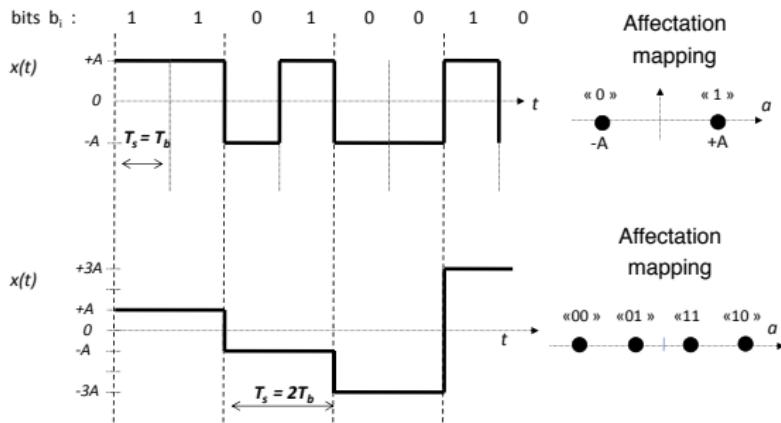
avec $g(t)$ la réponse impulsionnelle du réelle du filtre de mise en forme ou $T_s \cdot g(t)$ forme d'onde du codeur en ligne et $a_k \in A_{mod}$ un symbole à transmettre à l'instant d'indice $k \in \mathbb{Z}$

Code en ligne PAM : exemple

Modulation à M états d'amplitude

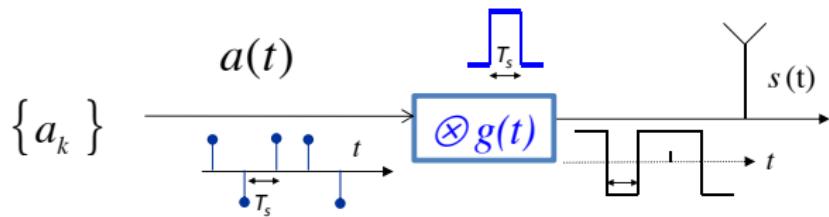
et

- **2-PAM** : $M = 2$ donc $n = 1$ bit/symbole,



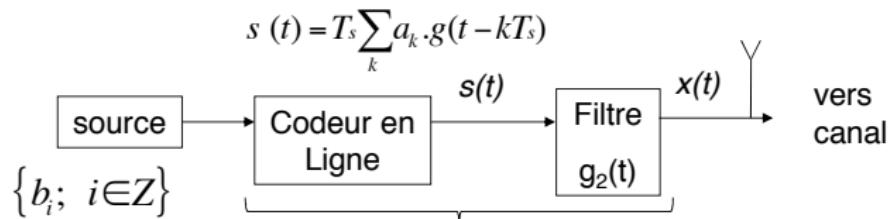
- **4-PAM** : $M = 4$ donc $n = 2$ bits/symbole,

Représentation convulsive d'un codage en ligne par MIA



- Filtrage : $s(t) = a \otimes g(t)$ avec $a(t) = T_s \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k \delta(t - kT_s)$
- Exemple : $a_k \in \{-A; +A\}$ et $g(t)$ une impulsion rectangulaire

Structure de la chaîne d'émission en bande de base (cas MIA)



- $g(t)$: réponse impulsionnelle réelle du filtre de mise en forme global d'émission ou forme d'onde de l'émetteur (incluant le filtre)
- $G_2(s)$: fonction de transfert obtenue par TF

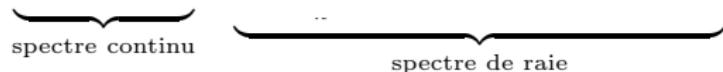
Densité spectrale des codes PAM

(formule de Bennett)

(TFD de($R_a(k)$)_k)

(autocorrelation de(a_k)_k)

On a aussi :


spectre continu .. spectre de raie

Contraintes imposées aux codes

- Forme du spectre :
 - pas de basses fréquences et/ou de composante continue
 - faible largeur de bande
- somme digitale glissante (SDG) faible pour limiter l'énergie non-informative

pour une mise en forme $s(t)$ nulle hors de $[0, T_s]$,

- récupération du rythme des symboles —> nombreuses transitions



Différents types de codes

- **Élémentaire / par blocs :**

Codage **élémentaire** : à 1 bit b_i (ou 1 symbole s_i) correspond un signal de durée T_s d'amplitude a_i

Codage **par blocs** : à un groupe de bits (ou de symboles) correspond un signal de durée supérieure à T_s

- **Binaire / M -aire :**

Codage **binaire** : 2 valeurs possibles pour a_i

Codage **M -aire** : $M (> 2)$ valeurs possibles pour a_i

- **Direct / différentiel :**

Codage **direct** : l'information est donnée par le niveau du signal

Codage **differentiel** : l'information est donnée par l'existence ou l'absence de transitions

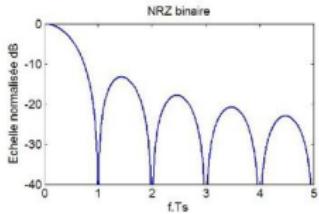
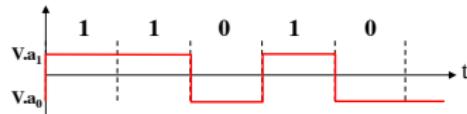
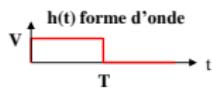
Rendement : rapport entre nb de bits codés par symbole et \log_2 (nb de symboles).

Codes binaires élémentaires directs

- NRZ polaires (ex : PC / périphériques) :

- Caractéristiques statistiques des données :
- DSP :

Le spectre d'un code NRZ polaire (binaire) s'annule quelque soit les multiples de $1/T_s$ où T_s est le temps symbole

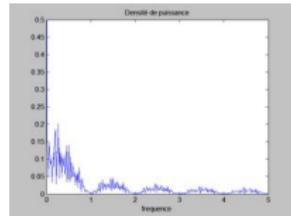
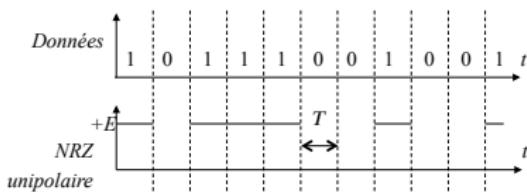


Codes binaires élémentaires directs

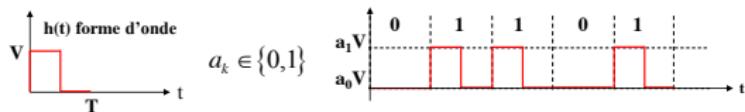
■ NRZ unipolaire :

Propriétés :

- + $B = 1/T_s$
- basses fréquences et composante continue
- SDG peut être très grande
- peu de transitions si longues suites de 0 ou de 1
- + codage et décodage simples
- pas de redondance

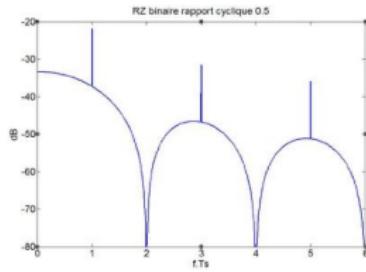


RZ unipolaire (ex : fibre optique)



- $h(t)$ est un signal de durée T réparti comme suit : porte de durée λT suivi d'un retour à zéro de durée
- Caractéristiques statistiques des données :
-

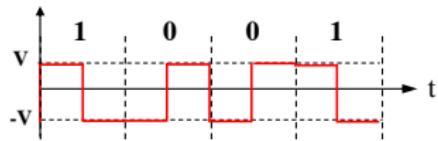
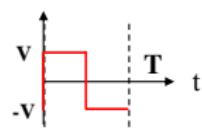
- DSP : superposition d'un spectre continu et d'un spectre discret (harmonique impaire de T)



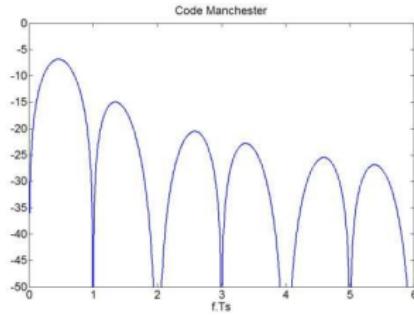
La raie en $1/T_s$ permet de récupérer l'horloge en réception

Biphase ou Manchester (ex : Ethernet) :

forme d'onde $h(t)$

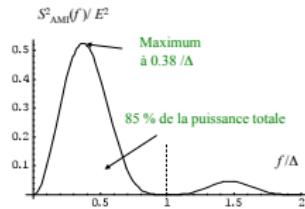
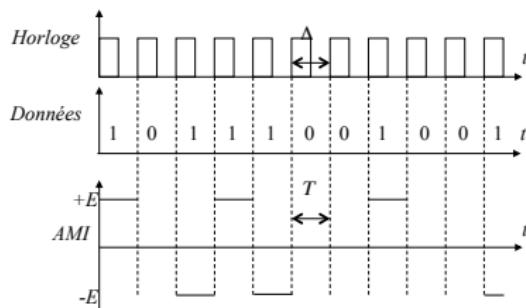


- Transition de V à $-V$ à chaque temps symbol (récupération d'horloge par détection des fronts)
- spectre sans partie discrète
- DSP :



AMI, Alternate Mark Inversion

- Densité spectrale de puissance d'une suite binaire aléatoire :
 - de 0 à $1/\Delta \rightarrow 85\%$ de la puissance totale
 - pas de composante continue
 - maximum de la puissance à
 - DSP :

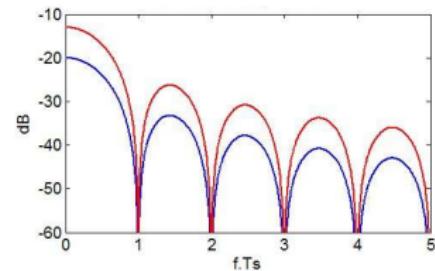
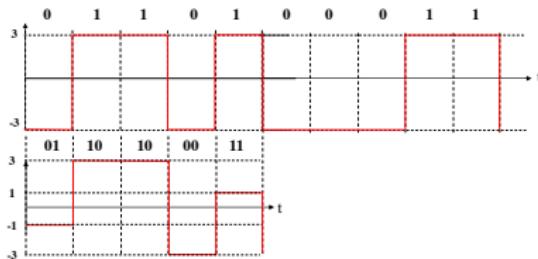


NRZ M-aire

- En général, $M = 2k$ symboles pour des groupes de k bits \Rightarrow débit symbole
- Durée symbole $T_s = kT_b$ (T_b : durée bit),

- Caractéristiques statistiques des données : et
- DSP : avec symboles indépendants.
Si $h(t)$ est une porte de temps symbole T_s alors

NRZ M-aire



Exemple d'un code quartenaire :

- Pour un même temps symbole T_s , plus de bits sont transmis pour une bande passante
- Plus de sensibilité au bruit

- Densité spectrale de puissance pour une même amplitude max V

Codes binaires différentiels

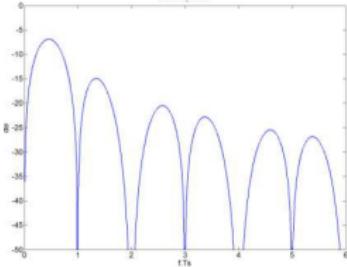
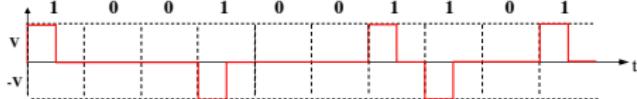
Encore appelés codes corrélés ou à mémoire

■ NRZ différentiel :

- transition d'un niveau à un autre si un "1" est transmis
- pas de transition si un "0" est transmis
- Cela revient à faire du NRZ direct sur la séquence $(b_k)_k$ telle que :

où $(a_k)_k$ est la séquence de bits d'entrée.

- DSP :



⇒ DSP nulle en $f = 0$

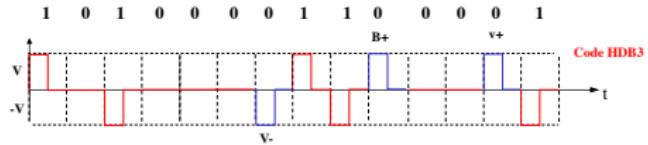
Codes binaires différentiels

■ HDBn (RTC) :

- $(n+1)$ "0" consécutifs remplacés par un bloc contenant au moins un "1", avec viol de parité.
- Objectifs : ajouter des transitions, permettre la récupération d'horloge

■ Exemple : codage HDB3 (blocs de 4 bits)

- bits "1" : codés alternativement par $\pm A$
- bits "0" : "0" si pas de bloc "0000"
- pour le bloc "0000" :
 - er "0" codé par $\pm A$ (avec respect de la polarité) si le dernier viol de parité est de même polarité que celle du dernier "1" précédent le bloc ; par 0 sinon ;
 - 0 pour les 2^e et 3^e "0" ;
 - 4^e "0" codé par $\pm A$ avec viol de parité
- DSP semblable à celle d'un code bipolaire RZ



Codes binaires différentiels

- **xB-yT** : blocs de x bits codés par y éléments ternaires, de niveaux $\pm A$ ou 0.
Objectif : augmenter le rendement du code AMI (égal à 0.63)

$$\text{rendement} = 0.63 \frac{x}{y}$$

exemple : code 4B-3T : 16 quadruplets/27 triplets possibles, rendement = 0.84

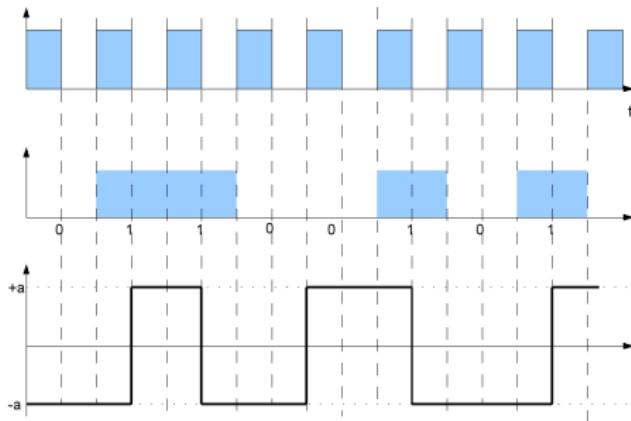
- **xB-yQ** : blocs de x bits codés par y éléments quaternaires
exemple : 2B-1Q, code en ligne à l'interface "U" du RNIS, HDSL.
- **xB-yB** : blocs de x bits codés par y éléments binaires
exemple : 1B-2B (CMI), code en ligne pour liaison fibre optique.
 - "00" codé par "-A + A"
 - "11" codé par "+A +A" ou "-A -A"

Code de Miller

- Le code Miller s'obtient à partir du codage Manchester dans lequel on supprime une transition sur deux
- Les règles d'encodages sont :
 - Si le bit de donnée vaut 1, alors on insère une transition au milieu de l'intervalle significatif
 - Si le bit de donnée vaut 0, alors pas de transition au milieu de l'intervalle significatif, mais si le bit suivant vaut 0, alors on place une transition à la fin de l'intervalle significatif
- caractéristiques de ce code sont les suivantes :
 - permet des débits élevés sur support à bande passante limitée
 - une puissance non nulle est transmise pour la fréquence nulle, ce qui peut introduire des distorsions
 - Le principal inconvénient de ce code tient en une moins grande immunité vis-à-vis du bruit.

Code de Miller

Exemple illustrant le code de Miller



Codage de Gray

Blocs de k bits $(b_i)_{i=0,\dots,k-1}$ en codage binaire (entiers de 0 à $2^q - 1$)
 ⇒ recodage des entiers par un code de Gray : modification d'un seul bit pour passer d'un entier à l'autre.

Algorithme :

mot initial $b_{k-1}b_{k-2}\dots b_1b_0 \Rightarrow$ nouveau mot $a_{k-1}a_{k-2}\dots a_1a_0$ défini par :

$$a_{k-1} = b_{k-1}$$

$$a_i = b_{i+1} \oplus b_i, i = 0, \dots, k-2$$

Intérêt :

1 erreur symbole \Rightarrow 1 erreur bit

exemple : $k = 2$, symboles 00,01,10,11