

Modulation, Codage et Théorie de l'Information

Introduction

El-Hadi Djermoune

4 février 2026

Université de Lorraine
Faculté des Sciences et Technologies
L2 Sciences Pour l'Ingénieur

CRAN UL CNRS – département BioSiS
Bureau: 422, Bât. Henri Poincaré 4^e étage
email: el-hadi.djermoune@univ-lorraine.fr

Objectif et organisation de l'EC

Systèmes de communication & appellations

Systèmes de communication numérique

Définitions et appellations

Que faut-il attendre de ce cours ?

... en version courte : une introduction aux télécommunications du point de vue modulations et performances.

- **Organisation de l'UE** : EC $\ll$ 403.2 Modulation, codage et théorie de l'information $\gg$
 - CM : $7 \times 2h$ (E.-H. Djermoune 8h & P. Catala 6h)
 - TD : $8 \times 2h$ (P. Catala)
 - TP : $5 \times 3h$ (E.-H. Djermoune 8h & P. Catala 6h) – 2 groupes
- **Mise en œuvre** : exercices écrits et sur machines
- **Evaluation** : 2 examens écrits (CC1 2h et CCT 2h) + 1 examen TP (1h ou 2h)
- **Partie I : Modulation et codage** (E.-H. Djermoune)
 1. Introduction aux modulations numériques, représentations des signaux
 2. Modulations numériques en bande de base et sur fréquence porteuse
 3. Représentation spectrale des modulations
 4. Performances des modulation numériques : canal de Nyquist
- **Partie II : Théorie de l'information** (P. Catala)
 1. Introduction : systèmes de communication, signaux et images
 2. Échantillonnage et quantification
 3. Codages de source, codage de canal

Objectif et organisation de l'EC

Systèmes de communication & appellations

Systèmes de communication numérique

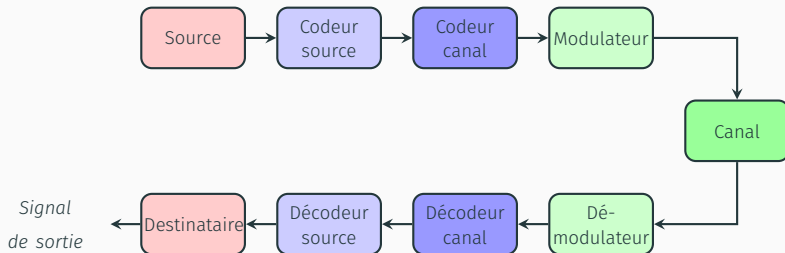
Définitions et appellations

Éléments d'un système de communication

“L'objectif principal d'un système de communication est de reproduire en un point de la chaîne de communication, soit exactement soit approximativement, un message sélectionné en un autre point.” [Shannon, 1948].

Le but du cours de “communications numériques” est d'étudier les modèles de communication et pouvoir comparer les performances d'une technique par rapport à une autre. Ce cours est donc essentiellement un cours de modélisation.

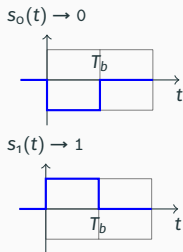
Les éléments d'une chaîne de communication sont :



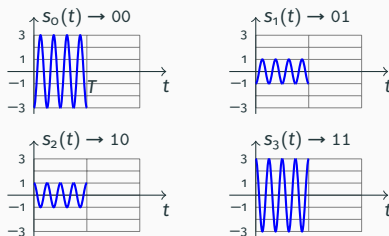
Éléments d'un système de communication

- **Source** : dispositif capable de générer un signal analogique (e.g. audio/vidéo) ou numérique (ordinateur). Dans les systèmes num., le signal est converti en une séquence de données **binaires**.
- **Codeur source** : dispositif capable de générer une séquence plus **économique** de l'information produite par la source (**compression**).
- **Codeur canal** : dispositif dédié à la **protection de l'information** des perturbations du canal. Il introduit une redondance dans la séquence binaire qui permet au récepteur d'éviter les effets des bruit extérieurs.
- **Modulateur** : dispositif qui sert à **transformer une séquence binaire** en une **suite d'ondes** capables de se propager dans le canal.

Modulation binaire (NRZ)



Modulation M -aire (ASK-4, $M = 4$)



Éléments d'un système de communication

- **Canal** : il représente le **support physique** du signal. Pour une communication sans fil, le canal peut être l'atmosphère et le signal une onde électromagnétique. Les canaux téléphoniques utilisent une variété de média : les câbles, les fibres optiques et sans fil (ondes radios). Quel que soit le canal, le signal sera corrompu par d'autres signaux non contrôlables (dits aléatoires), tel que le **bruit** thermique généré par les composants électroniques ou le bruit atmosphérique.
- **Démodulateur** : il se situe du côté récepteur. Son rôle est de transformer les ondes reçues en une séquence de symboles qui représente une **estimation des données** envoyées.
- **Décodeur canal** : exploite le code utilisé par le codeur canal et la redondance contenue dans les données reçues pour reconstruire la séquence d'information d'origine. Une mesure de la qualité de l'information reconstruite par la combinaison modulateur-décodeur est la probabilité moyenne d'erreur bit. Celle-ci dépend du code utilisé, de la nature des ondes et de la puissance du bruit dans le canal.
- **Décodeur source** : il sert à reconstruire le signal d'origine en utilisant le code source (**décompression**).

Caractéristiques des canaux de communication

Les canaux de communication servent de moyen de connexion entre l'émetteur et le récepteur. Un canal physique peut être une **paire de fils** transportant un signal électrique, une **fibre optique** transportant l'information sur un flux lumineux modulé, un **canal sous-marin** pour une transmission acoustique, ou l'**espace libre** au travers duquel le signal est rayonné par une antenne.

Problème commun à tous les supports de transmission : **le bruit additif** (bruit thermique, interférence, atténuation, trajets multiples, ...).

Quand **le bruit occupe la même bande de fréquence que le signal utile**, il est possible de minimiser son effet par un choix approprié du couple modulateur-démodulateur. Les effets du bruit peuvent aussi être réduits en augmentant la puissance du signal, mais les équipements limitent le niveau de puissance du signal émis.

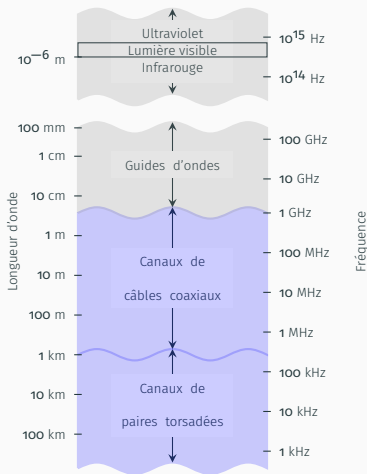
Caractéristiques des canaux de communication

Le réseau téléphonique utilise essentiellement des lignes filaires pour la transmission de la voix, les données et la vidéo. Les **paires torsadées** et les **câbles coaxiaux** sont des canaux électromagnétiques guidés.

Caractéristiques principales

- Bande passante : quelques centaines de kHz pour les paires torsadées et plusieurs MHz pour les câbles coaxiaux.
- Distorsions : amplitude et phase. Les paires torsadées sont sujettes au problème de diaphonie.
- Bruit : additif (thermique).

La figure montre les intervalles de fréquences pour les canaux guidés incluant les guides d'ondes et les fibres optiques.

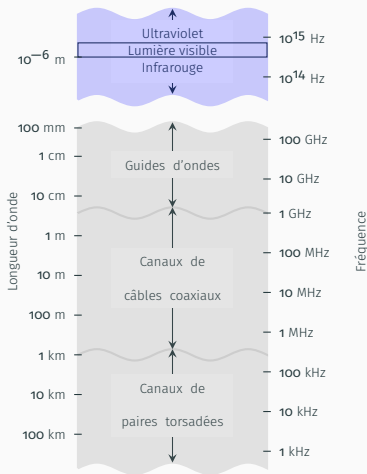


Caractéristiques des canaux de communication

Les **fibres optiques** offrent au concepteur d'un système de communications une bande passante plusieurs fois plus grande que celle d'un câble coaxial.

Caractéristiques principales

- Faible atténuation.
- Systèmes photonique très sûrs : transmission par LED ou laser, réception par photo-diode.
- Sources de bruit : photo-diodes et amplificateurs.

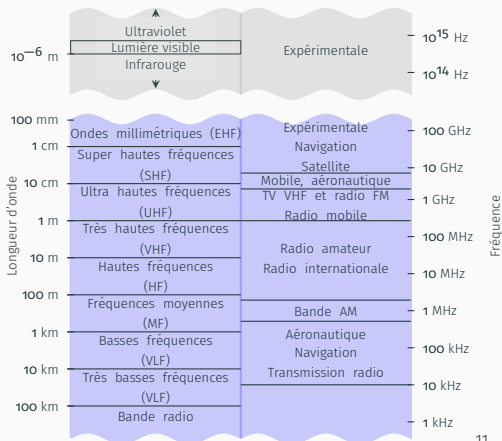


Caractéristiques des canaux de communication

Dans les systèmes de communication **sans fil**, l'énergie électromagnétique est couplée au milieu de propagation par une antenne. La **longueur** de l'antenne dépend de la **fréquence utilisée** : elle doit être supérieure à $\lambda/10$ (λ : longueur d'onde) pour un gain maximum.

Exemple

Une station radio émettant dans la bande AM avec une fréquence $f_0 = 10$ MHz ($\lambda = c/f_0 = 300$ m), nécessite une antenne d'au moins 30 m.



Caractéristiques des canaux de communication

Le mode de propagation des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère et l'espace libre peut être divisé en trois catégories.

- **Propagation terrestre :** dans les VLF et audio où la longueur d'onde excède 10 km, la terre et l'ionosphère agissent comme un guide d'onde. Dans ces canaux, le signaux se propagent pratiquement sur tout le globe. Pour cette raison, ces bandes sont réservées à la navigation. La largeur de bande (bande passante) est relativement faible (1–10 % de la fréquence centrale), donc l'information transmise est petite et se fait à bas débit.
- **Propagation aérienne ionosphérique et troposphérique :** ce mode de propagation résulte de la réflexion des ondes par l'ionosphère. La bande de fréquences concernées varie entre 2 et 30 MHz pour une transmission par réflexion (jusqu'à la bande HF).
- **Propagation dans le champ de vision :** dans ce mode, l'émetteur et le récepteur doivent être en vision directe avec peu ou pas d'obstacles. D'où, dans le cas des bandes VHF et UHF, l'installation d'antennes TV sur de hautes tours dont la taille est liée à la portée souhaitée étant donnée la courbure de la surface terrestre. Le bruit dominant pour les bandes VHF et UHF est le bruit thermique.

Bit

Dans les transmissions numériques, les valeurs envoyées sont des suites de 0 et de 1. Un **bit** est un élément de l'ensemble $\{0, 1\}$. On appelle **temps bit** (T_b) le temps nécessaire à la transmission d'un bit.

Débit binaire

Le **débit binaire** D se définit comme le nombre de bits transmis par seconde :

$$D = \frac{1}{T_b} \quad (\text{en bits par secondes}) \quad (1)$$

Taux d'erreur par bit (TEB)

La **qualité d'une liaison** est liée au taux d'erreur par bit :

$$\text{TEB} = \frac{\text{nombre de bits faux}}{\text{nombre de bits transmis (nbit)}} \quad (2)$$

La **probabilité d'erreur** (P_e) est définie par :

$$P_e = \mathbb{E} \{ \text{TEB} \} = \lim_{n\text{bit} \rightarrow \infty} \text{TEB}(n\text{bit}).$$

Symbole

En groupant sous forme d'un bloc de n bits indépendants, on obtient un alphabet de $M = 2^n$ symboles. Un symbole est donc une généralisation d'un bits : un symbole M -aire véhicule l'équivalent de $n = \log_2(M)$ bits. Actuellement, les transmission les plus performantes sont des transmissions par symboles (dites M -aires). On note T le temps nécessaire à la transmission d'un symbole.

Rapidité de modulation

La rapidité de modulation R se définit comme le nombre de symboles (ou de changements d'états) par seconde :

$$R = \frac{1}{T} \quad (\text{en bauds ou "symboles par seconde"}) \quad (3)$$

Pour un alphabet M -aire, on a la relation fondamentale :

$$T = nT_b \text{ soit } D = nR \quad (4)$$

Il y a égalité entre débit et rapidité de modulation uniquement pour une source binaire.

Bande passante

La **bande passante** B d'un canal de transmission (câble, canal hertzien, fibre optique, ...) est l'intervalle des fréquences réservé pour une transmission. Elle s'exprime en hertz.

Efficacité spectrale

L'**efficacité spectrale** d'une modulation se définit par le paramètre :

$$\eta = \frac{D}{B} \text{ (bit/seconde/Hz)} \quad (5)$$

Pour un signal utilisant des symboles M -aires, on aura :

$$\eta = \frac{\log_2(M)}{BT} \quad (6)$$

Remarquons que pour B et T donnés, l'efficacité spectrale augmente avec le nombre de bit/symbole $n = \log_2 M$. C'est en effet la raison d'être de la modulation M -aire.

Exemples de systèmes de communication

Système	Débit	Bande	Efficacité spectrale
TNT	10 Mbits/s	8 MHz	1,25 bits/s/Hz
GSM	13 kbits/s	25 kHz	0,5 bits/s/Hz
UMTS	3,4 Mbits/s	5 MHz	0,7 bits/s/Hz
POTS ¹	13 kbits/s	4 kHz	3,3 bits/s/Hz
Modem	56 kbits/s	4 kHz	14 bits/s/Hz
ADSL ²	500 kbits/s	1 MHz	0,5 bits/s/Hz
VDSL ³	10 Mbits/s	20 MHz	0,5 bits/s/Hz

¹ : Plain Old Telephone Service. Sur xDSL existe 3 canaux : downstream (haut débit), upstream (moyen débit) et POTS pour la téléphonie classique.

² : Asymmetric Digital Subscriber Line.

³ : Very high bitrate DSL (haut débit sur de courtes distances).

Limites théoriques du débit

Limite de Shannon

Soit un canal de bande passante B sujet à des perturbations (bruit) de puissance N . Le signal transportant l'information est de puissance S . Le théorème de Shannon stipule que si le débit binaire est inférieur à la limite :

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{en bit/s}) : \quad \log_2(x) = \ln(x)/\ln(2)$$

alors, il existe des codes permettant une transmission sans erreurs. Cette limite est appelée **capacité** du canal. Si cette limite est dépassé, le décodage n'est pas **garanti sans erreurs**.

Limite de Nyquist

Soit un canal de bande passante B . Le théorème de Nyquist stipule que la rapidité de modulation pour une transmission sans interférences inter-symboles doit vérifier :

$$R \leq 2B.$$

Si la condition n'est pas vérifiée, le décodage ne peut pas être effectué de **façon séquentielle**.

Transmission numérique : codes en ligne

Les **codes en ligne** ou **en bande de base** sont des mécanismes de codage qui transforment une suite binaire en **un signal analogique non modulé**.

Codes binaires

- RZ unipolaire : '1' est codé avec un signal continu d'amplitude $+A$ pendant $T_b/2$ puis 0 pendant $T_b/2$. '0' est codé avec un signal nul durant toute la durée T_b ;
- NRZ (non retour à zéro) : '1' est codé avec un signal continu d'amplitude $+A$ et '0' avec une amplitude $-A$, pendant le temps bit T_b ;
- Manchester (biphase) : '1' est codé avec un signal continu d'amplitude $+A$ pendant $T_b/2$ puis $-A$ pendant $T_b/2$. Inversement pour '0'.

Codes M-aire

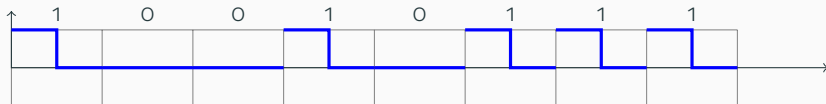
- NRZ M -aire : chaque séquence de $m = \log_2(M)$ bits est codé avec un signal continu dont l'amplitude est un élément de l'alphabet $\{-(M-1)A, -(M-3)A, \dots, -A, +A, \dots, (M-3)A, (M-1)A\}$ pendant le temps symbole T .

Exercice : coder la suite 1010001101 selon NRZ, Manchester et NRZ quaternaire.

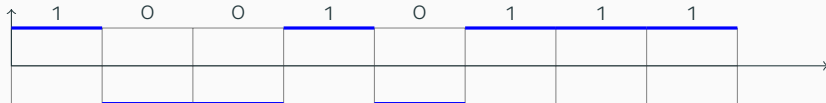
Transmission numérique : codes en ligne à 2 états

On rappelle que T_b est le temps bit.

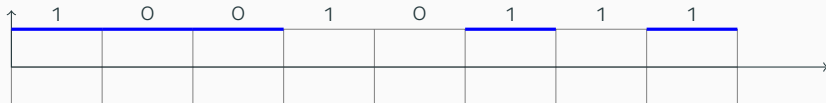
- **RZ unipolaire** (Return to Zero) : 0 $\rightarrow$ 0 pendant T_b ; 1 $\rightarrow$ +A pendant $T_b/2$ puis 0 pendant $T_b/2$.



- **NRZ** (Non Return to Zero) : 0 $\rightarrow$ -A; 1 $\rightarrow$ +A.



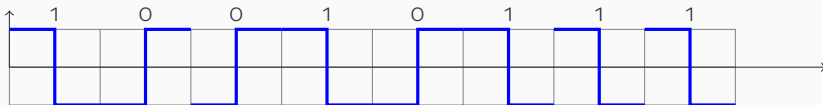
- **NRZi** (Non Return to Zero inverted) : 0 $\rightarrow$ même polarité que le bit précédent; 1 $\rightarrow$ inverser la polarité.



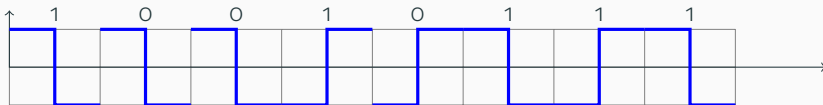
Transmission numérique : codes en ligne à 2 états

On rappelle que T_b est le temps bit.

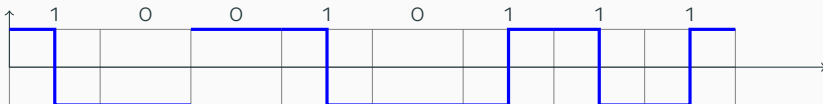
- **Manchester** : 0 $\rightarrow$ $-A$ pendant $T_b/2$ puis $+A$ pendant $T_b/2$; 1 $\rightarrow$ $+A$ pendant $T_b/2$ puis $-A$ pendant $T_b/2$



- **Manchester différentiel** : 0 $\rightarrow$ émettre le même signal que pour le bit précédent; 1 $\rightarrow$ inverser le signal émis pour le bit précédent.



- **Miller** : 0 $\rightarrow$ si bit précédent est 1, garder la polarité, sinon l'inverser au début du cycle; 1 $\rightarrow$ inverser la polarité au milieu du cycle.



Transmission numérique : codes sur fréquence porteuse

La **transmission sur fréquence porteuse** ou **transmission modulée** utilise des signaux de la forme :

$$x(t) = A \cos(2\pi f t + \phi)$$

Chaque bit (ou séquence de bits) du message est envoyé en modifiant :

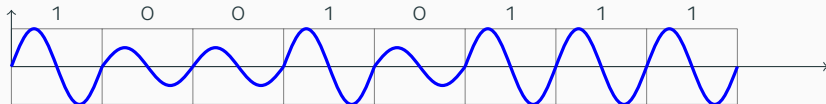
- **l'amplitude A** : modulation d'amplitude (ASK);
- **la fréquence de la porteuse f** : modulation de fréquence (FSK);
- **la phase ϕ** : modulation de phase (PSK);
- une combinaison de ces trois paramètres (transmission M -aire).

Exercice : coder la suite 1010001101 en utilisant une modulation de phase :

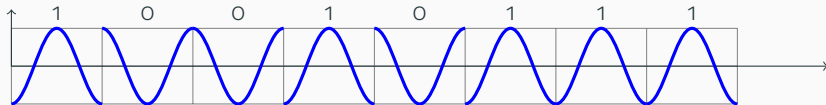
1. binaire : $A = 1$, $f = 1000$ Hz, $T_b = 2$ ms, $\phi = 0$ pour '0' et $\phi = \pi$ pour '1';
2. quaternaire : $A = 1$, $f = 1000$ Hz, $T_b = 2$ ms, $\phi = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ pour '00', '01', '11', '10'.

Transmission numérique : ASK, PSK, FSK

- **ASK** : 0 $\rightarrow A = A_0$ pendant T_b ; 1 $\rightarrow A = A_1 \gg a$ pendant T_b



- **PSK** : 0 $\rightarrow \phi = 0$; 1 $\rightarrow \phi = \pi$



- **FSK** : 0 $\rightarrow f = f_0$; 1 $\rightarrow f = 2f_0$

