

septembre 2005



MASTER 2

TECHNIQUES ET TECHNOLOGIES DES TELECOMMUNICATIONS

## **COURS DE TRANSMISSION DE DONNEES NUMERIQUES**

Cours polycopié

Florence SAGNARD

## SOMMAIRE

### **Chapitre 1 : Concepts liés à la transmission de données**

1. La normalisation
2. L'information
3. Le codage
4. La transmission de données
5. Caractéristiques techniques des supports de transmission
6. La chaîne de transmission numérique

### **Chapitre 2 : Les techniques de codage d'un signal numérique : les codes en ligne**

### **Chapitre 3 : Transmission numérique en bande de base sur un support à bande passante limité**

1. Transmission à travers un canal non bruité
  - Diagramme de l'œil
  - Interférence inter-symbole
  - Les deux critères de Nyquist
2. Transmission à travers un canal bruité
  - Transmission d'un symbole binaire unique
  - Transmission d'un symbole M-aire unique
  - Transmission d'une suite de symboles M-aires
  - Transmission à travers un canal à bande passante limitée vérifiant le critère de Nyquist

### **Chapitre 4 : Transmission en bande transposée**

1. Types de modulation
2. Filtre passe bas équivalent

## BIBLIOGRAPHIE

- M. STEIN, "Les modems pour transmission de données", Masson, 1987
- J.C. BIC, D. DUPONTEIL, J. C. IMBEAUX, "Eléments de communications numériques", tomes 1 et 2, Dunod, 1986
- A. GLAVIEUX, M. JOINDOT, "Communications numériques", Masson, 1996
- W. STALLINGS, "Data and computer communications", Third Edition, Macmillan Publishing Company, 1991
- S. PIERRE, M. COUTURE, "Télécommunications et transmission de données", Eyrolles, 1992
- P.G. FONTOLLIET, "Systèmes de télécommunications", Dunod, 1983
- Les Techniques de l'Ingénieur

## Chapitre 1 : CONCEPTS LIES A LA TRANSMISSION DE DONNEES

Le principe fondamental de la transmission de données **est l'échange d'information entre deux entités**. L'information subit, tout au long du processus de communication, un certain nombre de **manipulations** et de **transformations** avant d'être délivrée à son destinataire. Elles concernent :

- le codage,
- la transmission,
- le stockage et le traitement.

Tout transfert d'information, qu'elle soit de nature :

symboles, écrits, images fixes ou animées, son ...

par quelque moyen que ce soit :

fil, radio, liaison optique

appartient **au monde des télécommunications**.

Quelque soit le type d'information à transmettre, **le principe est d'assurer un transfert fiable d'informations d'une entité communicante A vers une entité communicante B**.

Ce transfert nécessite :

- **des données** à transférer, traduites dans un système compréhensible par les entités communicantes,
- **un lien** entre les entités communicantes (support ou réseau de transport)
- **un système d'adaptation** entre l'entité communicante et le support
- **un mode d'échange de données**
- **un protocole de dialogue** (règles à suivre pour effectuer un échange d'informations)

Un tel transfert d'informations nécessite de satisfaire les conditions suivantes :

- la source et le destinataire doivent se mettre d'accord sur la représentation symbolique de l'information à transmettre (le code utilisé)
- le "canal de transmission" doit être transparent pour assurer un rôle neutre dans l'acheminement (pas d'introduction d'interférences sur l'information à transmettre)

### 1. La normalisation

Elle consiste en **un ensemble de règles destinées à satisfaire un besoin de manière similaire**. Elle assure une réduction des coûts d'étude, la rationalisation de la fabrication et garantit un marché plus vaste. Elle couvre tous les domaines de la communication, du groupement de constructeurs aux organismes internationaux. D'une façon générale, **elle ne s'impose pas** sauf l'ETSI (European Telecommunications Standard Institute) qui normalise les réseaux publics et leurs moyens d'accès.

### **Les organismes nationaux**

- **AFNOR** : Association Française de NORmalisation, divisée en commissions : industriels, administrations, utilisateurs
- **ANSI** : American National Standard Institute (USA)
- **DIN** : Deutsches Institut für Normung (Allemagne) (prises DIN)
- **BSI** : British Standard Institute (G.B)

### Les organismes internationaux

- **ISO** : International Standardization (90 pays et la France)
  - **V** : modems, interfaces
  - **T** : applications télématiques
  - **X** : réseaux de transmission de données
  - **I** : RNIS
  - **Q** : téléphonie et signalisation

### 2. L'information

Il existe un langage propre à la transmission des signaux numériques. Sont ici présentées les principales définitions qu'il est important de connaître.

L'information échangée apparaît sous la forme d'un **message** noté  $m$  ; elle est généralement présentée à un récepteur sous la forme d'un signal  $g(t)$  dépendant du temps, appelé **donnée**.

Par définition **une donnée** est la représentation d'un fait, concept ou instruction formalisée d'une manière convenable pour être communiquée, interprétée ou traitée par des moyens manuels ou automatiques.

**Une information** est la signification qui peut être apportée à des données en utilisant des conventions spécifiques.

De ces définitions, plutôt académiques, il faut retenir qu'**une donnée ne représente pas toujours quelque chose de physique**, dans le domaine de la mesure ; **toute donnée peut servir à produire de l'information dans le cas où elle peut être interprétée**. Pour échanger de l'information, cela nécessite d'avoir accès à des éléments de données et d'être capable de les transmettre.

On distingue deux types d'information :

- **continue ou analogique** : résultat de la variation continue d'un phénomène physique (température, voix, image). Un signal analogique peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle déterminé.
- **discrète** : résultat d'une suite d'éléments **indépendants les uns des autres** : un texte est une association de mots, eux-mêmes composés de lettres (symboles élémentaires). A chaque élément, on substitue une représentation binaire représentative : **c'est l'opération de codage** de l'information (codage à la source) et de numérisation pour les informations analogiques.

On définit :

- **un symbole** : est un élément constitué de  $n$  bits
- **le format** : c'est la représentation physique du signal émis
- **le code** : c'est le résultat de la transformation d'un signal numérique en un autre signal numérique



### Pourquoi utiliser des informations numériques ?

La transmission numérique de signaux de parole ou de signaux vidéo consomme de la bande passante et réclame des équipements coûteux, et pourtant les inconvénients surpassent les avantages et la part du trafic numérique ne cesse d'augmenter.

### Les applications des transmissions numérique de parole-vidéo et de données

Pour transmettre des signaux analogique sous forme numérique, on utilise la modulation par impulsion codées (**MIC**) (en anglais **PCM**, Pulse-Code Modulation). Il s'agit d'échantillonner le signal à la fréquence d'échantillonnage  $F_e$ . On obtient ainsi  $F_e$  échantillons numériques par seconde. Chaque échantillon est transformé en une suite finie de 0 et de 1 (un mot binaire) de longueur  $n$  : c'est l'opération de conversion analogique/numérique (A/D). Ce sont les symboles binaires (bits) ainsi obtenus qui sont transmis par un système de communication numérique. A la réception, le flot de symboles binaires est transformé en une suite d'échantillons : c'est la conversion numérique/analogique (D/A). Les échantillons passent ensuite dans un filtre passe-bas qui reconstruit le signal original. Mentionnons qu'il est **nécessaire de choisir une fréquence d'échantillonnage égale à 2 fois la largeur de bande B du signal**.

Exemple : Pour le signal de parole qui occupe une bande de fréquences allant de 300 à 3300Hz, on prend une bande de sécurité  $B = 4000$  Hz, d'où une fréquence d'échantillonnage de  $2B=8000$  Hz. Il y a donc 8000 échantillons par seconde. Lorsque l'on n'utilise pas de technique particulière de compression d'information, on représente chaque échantillon par un mot de  $n=8$  bits. Le débit binaire en sortie du convertisseur A/D est donc de  $8 \times 8000 = 64000$  bits par seconde.

Notons que la modulation MIC permet le multiplexage temporel (TDMA) qui est l'équivalent du multiplexage fréquentiel en communication analogique. Il s'agit de faire confluer  $N$  flots de symboles binaires pour former un seul flot. Par exemple pour  $N=24$  voies de parole, le flot aura une vitesse de  $24 \times 64000 = 1536$  kbits par seconde. Il faut ajouter les informations de synchronisation et de supervision, ce qui conduira à un débit plus élevé : 2048 kbits/sec pour 30 lignes de 64 bits, en France. Pour la télévision numérique, les débits atteignent couramment 100 Mbits/sec et vont jusqu'à 1 Gbits/sec pour les besoins des écrans des TV domestiques les plus performants. Ces débits peuvent être supportés par une fibre optique ou un canal satellite.

La transmission des données entre ordinateurs ne requiert pas la conversion d'un signal analogique en un flot de symboles binaires, comme dans le système MIC. Les deux types d'application parole-vidéo et données présentent des besoins différents.

En effet, les systèmes de transmission de données sont généralement beaucoup plus sensibles au taux d'erreurs par bit (TEB) que les systèmes de transmission de la parole. Cependant, ils sont moins sensibles aux défauts de synchronisation des horloges qui règlent le débit du flot des symboles à l'émission et à la réception. Une autre différence est l'utilisation sporadique des lignes de transmission dans les communications entre ordinateurs. On utilise la technique de **commutation de paquets** où les données de chacun des utilisateurs indépendants sont regroupés en paquets de longueur fixe et comportant une partie d'identification (destination, ordre d'arrivée, priorité). Ces paquets sont transmis indépendamment les uns des autres, puis regroupés lorsqu'ils arrivent à destination. Ces paquets utilisent la même ligne de transmission et en cas de congestion, ils sont stockés dans une mémoire-tampon en attendant une place libre dans la ligne. Dans les réseaux de téléphonie, on utilise la **commutation de circuits** qui consiste à allouer une ligne à chaque session ouverte (une session est par exemple une conversation téléphonique).

La tendance actuelle est à l'utilisation de réseaux de communication s'adressant à un trafic mixte (voix-vidéo et données) ; c'est ce qui est effectué dans les Réseaux Numériques à Intégration de

Service (**RNIS**) à large bande, pour lesquels la numérisation est effectuée le plus près possible de la source et où les lignes sont le plus "transparentes" possibles relativement à la nature du trafic.

### **Les avantages des systèmes numériques :**

- **L'avantage principal est la lutte contre le bruit.** Lorsqu'un signal est transmis sur une longue distance, dans un milieu physique, il subit une atténuation notable. Pour lutter contre cet effet, on utilise des répéteurs. Dans un système analogique, les répéteurs sont des amplificateurs, qui amplifie à la fois le signal utile et le bruit, si bien qu'au total bruit et distorsion augmentent avec la distance; dans un système numérique, les répéteurs régénèrent un signal propre, c'est à dire que le signal reçu est examiné pour en extraire le flot binaire initial puis retransmis. Un autre dispositif peut améliorer le rapport signal à bruit, c'est le codage correcteur d'erreurs. Le code correcteur va introduire de la corrélation entre les bits, "étaler" l'information en quelques sortes, laquelle est initialement localisée sur un bit. L'opération de codage est inversible, si bien qu'en sortie le décodage on va retrouver les échantillons servant à la reconstruction du signal original.
- **Les aspects économiques :**
  - Le coût des échantillonneurs et des convertisseurs A/D et D/A, obstacle auparavant majeur, est fortement réduit grâce à l'introduction de circuits intégrés,
  - Les répéteurs régénérateurs, plus complexes et plus chers qu'en analogique ont considérablement baissé,
  - La transmission numérique est coûteuse en bande, et ce n'est pas un inconvénient pour les canaux qui ne sont pas publics, comme les câbles ou les fibres optiques. Pour les canaux publics, par des techniques efficaces de codage, on cherche à réduire le nombre de bits par échantillon (le codage MIC delta adaptatif pour un signal de parole permet de passer de 64kbits/sec à 16 kbits/sec),
  - Les opérations de commutations et de multiplexage en numérique ont un plus faible coût qu'en analogique car elles demandent des filtres complexes,
  - Les canaux à fibres optiques peu coûteux sont mieux adaptés aux transmissions numériques.

### 3. Le codage

Il consiste à attribuer à chacun des caractères un nombre binaire déterminé dont le nombre de bits dépend du code utilisé. La mise au format est rendue nécessaire par l'utilisation d'un canal de transmission qui présente des caractéristiques électriques qui lui sont propres. Aussi faut-il adapter le signal à ces caractéristiques afin de réduire au minimum les distorsions induites lors de la transmission.

### **Les différents codes sont rassemblés sous les classifications suivantes :**

- **Codages de longueur fixe**

**Code BAUDOT (CCITT n°2) :**  $2^5 = 32$  caractères pour le télex (26 lettres de l'alphabet + 10 chiffres + commandes (fin de ligne ...) ...)

**Code ASCII (American Standard Code for Information Interchange) :**  $2^7 = 128$  caractères

**Code EBCDIC (Extended Binary decimal Interchange Code) origine IBM :**  $2^8 = 256$  caractères

- **Codage de longueur variable**

**Codage de HUFFMAN** où la longueur binaire d'un mot code est d'autant plus faible que l'occurrence d'apparition est importante

- **Codage en bande de base**

Ce type de codage, étudié dans ce cours, consiste à transmettre le signal sans modification de son spectre. Au signal de données initial, on substitue un autre signal similaire, dont le spectre de fréquences est mieux adapté à la ligne de communication. Il permet des débits binaires importants, selon la nature du support de télécommunication et de la distance.

- format RZ (Retour à Zero) : Unipolaire RZ, bipolaire RZ
- format NRZ (Non Retour à Zero) : Unipolaire NRZ, bipolaire NRZ, code Manchester, Code HDB d'ordre n.

- **Codage par modulation**

Le signal de données initial module une porteuse à haute fréquence en amplitude, en fréquence ou en phase.

#### 4. Principes de la transmission

##### **4.1. Généralités**

Dans le cas d'une transmission numérique, le signal binaire est transformé en une grandeur électrique (mise au format ou codage de source) afin de l'adapter aux contraintes du canal de transmission. Le système qui réalise cette opération est appelé **ETCD**, Equipement Terminal de Circuit de Données. Comme le montre la figure 1, cet adaptateur entre le terminal nommé **ETTD**, Equipement Terminal de Traitement de Données, et le canal de transmission doit être capable à la réception de transformer correctement les signaux électriques reçus en valeurs numériques malgré les distorsions (bruit, filtrage) du signal.

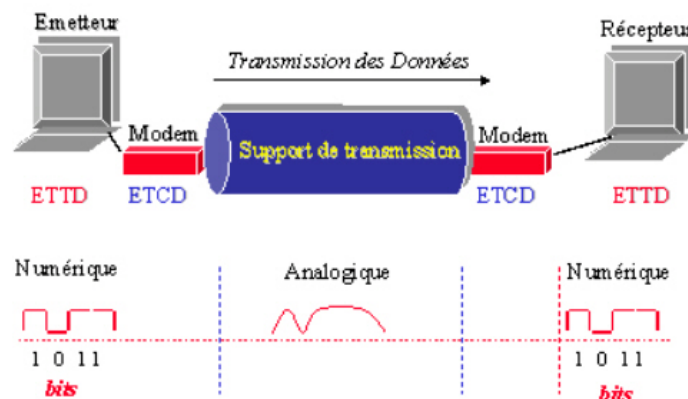


Figure 1 : La chaîne de transmission numérique de données

##### **4.2. Les types de transmission de données**

Entre deux installations terminales, la transmission peut être caractérisée par deux types d'options :

- série/parallèle
- synchrone/asynchrone.

D'autres paramètres peuvent aussi intervenir, tels que :

- le dialogue,
- la cadence,
- le contrôle,
- l'optimisation,
- la sécurité.

- **Transmission série**

Les éléments binaires composant un caractère codé sont émis les uns à la suite des autres ; les "n" bits de l'information sont échantillonnés séquentiellement par une horloge en émission et en réception. Soit  $\tau$  la durée élémentaire, il faut  $n\tau$  pour transmettre l'information (interface RS232C jusqu'à 9600 bits/sec pour 20 m, au delà il faut des modems).

Une interface de conversion est nécessaire pour mettre les bits en série ; conversion parallèle série et inversement. Il ne faut que deux conducteurs, donc le coût est peu élevé d'où son utilisation pour les transmissions à grandes distances.

- **Transmission parallèle**

Les bits sont transmis simultanément sur autant de fils que le code utilisé comporte de bits, chaque fil étant spécifique d'une position. Le support de transmission est appelé "bus". Les "n" bits codant l'information sont échantillonnés simultanément par une horloge en émission et en réception. La durée de transmission est  $\tau$ .

En général, dans un système de télécommunication, la transmission à distance s'effectue en série. En transmission série, la normalisation limite le nombre de solutions. Dans ce cas, on trouve les bus ISA, EISA, MCA pour PC et compatibles et les bus d'instrumentation HPIB correspondant au standard IEEE 488.

La transmission parallèle autorise une grande vitesse de transmission (débit) ; le coût est élevé puisqu'il faut autant de conducteurs que de fils à transmettre. Un conducteur supplémentaire peut servir à transmettre le signal de synchronisation.

- **Transmission asynchrone**

En transmission série, les bits d'un même caractère sont régulièrement espacés. Mais, **l'intervalle séparant deux caractères peut être variable** : c'est la transmission asynchrone. Ce mode de transmission caractérise **les liaisons à débit lent**, l'unité de mesure est le "baud" qui correspond à l'inverse du temps d'échantillonnage.

Des états particuliers délimitent chaque caractère START et STOP (début et fin) ; cela permet une synchronisation simple au niveau du caractère; l'échantillonnage est mis en route à la réception sur la détection du START et arrêtée sur le dernier bit STOP.

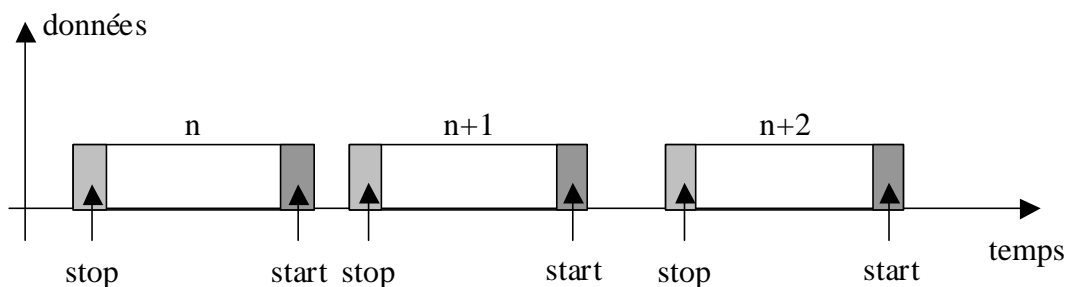


Figure 2 : Principe de la transmission asynchrone

- **Transmission synchrone**

Tous les bits d'un même message sont régulièrement espacés (figure 3). La cadence d'émission est celle de l'horloge. Elle peut être régénérée à partir du signal de données reçu. Cela suppose d'avoir un nombre de transitions du signal de données suffisant (alternance de 0 et 1).

Ce mode caractérise les échanges d'informations à haut débit par blocs ou par paquets. La lecture du flot de bits arrivant s'effectue dans un registre à décalage.

Les principaux protocoles sont :

- BSC : Binary Synchronous Communication (IBM)
- SDLC : Synchronous data Link Control (IBM)
- HDLC : High Level Data Link Control (ISO)
- PPP : Protocol Point to Point.

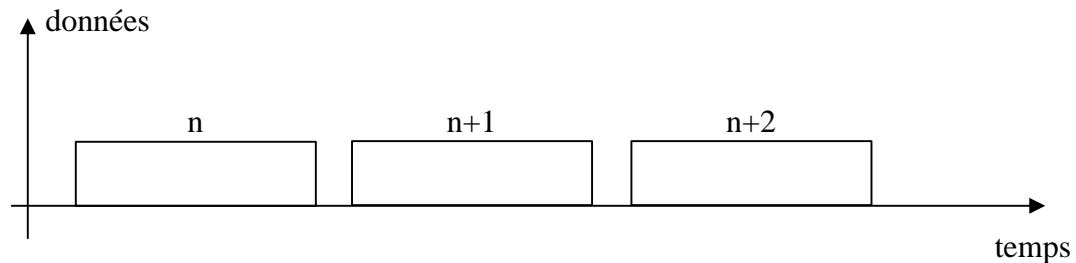


Figure 3 : Principe de la transmission synchrone

- On définit l'**efficacité d'un mode de transmission** par :  
 $E = \text{nombre de bits utiles} / \text{nombre de bits réellement transmis}.$
- **Dialogue et sens de transmission**  
Entre deux équipements A et B d'extrémité peuvent exister les liaisons directionnelles suivantes :

**a) Liaison en mode simplex**

L'exploitation de la transmission est en mode unidirectionnel

**b) Liaison en mode semi-duplex**

Les informations circulent alternativement de a vers B, puis de b vers A. L'exploitation est en mode bidirectionnel à l'alternat. Le sens de transmission est déterminé par une séquence de bits spécifiques avant l'échange proprement dit. Il y a un temps de retournement pour passer de A vers B à b vers A.

**c) Liaison en mode duplex intégral**

Les informations circulent dans les deux sens simultanément. Il faut quatre fils, c-à-d deux fils par sens de transmission. Ce type de liaison est le plus utilisé.

5. Caractéristiques techniques des supports de transmission

Les supports exploitent les propriétés :

- **de conductibilité des métaux** (paire torsadée, coaxial)
- **des ondes électromagnétiques** (faisceau hertzien, guide d'onde, fibre optique, satellite)

Un support de transmission est essentiellement caractérisé par :

- **son impédance caractéristique**
- **sa bande passante**

qui conditionnent le débit et la distance franchissable.

La ligne est dite adaptée lorsque l'impédance terminale est égale à l'impédance caractéristique de la ligne, soit  $Z_r = Z_c$ .

Toute rupture d'impédance ( $Z_r \neq Z_c$ ) provoque la réflexion d'une partie de l'énergie incidente. Cette énergie (onde réfléchie ou écho) se combine à l'énergie incidente pour former des ondes stationnaires. En transmission numérique, l'écho forme "des bits fantômes" qui introduisent des erreurs de transmission. **Il est donc nécessaire d'assurer la continuité ou l'adaptation de l'impédance.**

- **La bande passante**

C'est une grandeur de base qui renseigne sur **les possibilités d'une transmission sur une ligne**. Elle définit le système de transmission. C'est l'espace des fréquences tel que tout signal appartenant à cet intervalle ne subisse au plus qu'un affaiblissement déterminé ; on la définit à -3 dB, ce qui correspond à une atténuation de puissance de moitié. Cela permet de restituer correctement l'information, car en général les systèmes de transmission ne transmettent pas tous les harmoniques du signal de façon identique.

- **La largeur de bande**

Elle qualifie le signal ; elle exprime la largeur du spectre nécessaire à une reconstitution correcte du signal d'origine, car en pratique il faut limiter le spectre du signal.

- **Cadence de transmission des informations**

Les signaux en sortie du codeur sont véhiculés par le réseau de télécommunication à travers un canal (voie de transmission) et le **problème central de la transmission est la recherche de la capacité du canal**. C'est la quantité d'informations maximale que le canal peut transporter par unité de temps (bits/sec). De la capacité dépend la bande passante du canal qui est l'excursion de fréquences (min-max) tolérée. Par exemple, la voie téléphonique s'étend de 300 à 3400 Hz. En dehors de cette bande, le canal agit comme un filtre qui élimine les composantes de fréquence.

**Shannon a montré que la capacité d'un canal était limitée par la bande passante (B) et par le rapport signal à bruit (S/N).**

Le nombre d'états qu'il est possible de discriminer est :

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

La capacité de transmission du canal est :

$$C = 2B \log_2(n) = B \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

On appelle **rapidité de modulation (R)** le nombre maximal de transition qu'un système peut supporter ; c'est une grandeur analogue à une fréquence (Baud)

$$\begin{aligned} t_e &= T / 2 \quad (\text{alternance de 0 et de 1 sur } T) \\ R &= 1 / t_e \\ R_{\max} &\leq 2 f_{\max} \Rightarrow R \leq 2B \end{aligned}$$

Le **débit binaire** d'un canal quantifie la quantité d'information transportée sur le canal par unité de temps

$$D = 2B \log_2(n) \quad (\text{bits} / s)$$

Remarque : pour un codage binaire  $C = D$ .

Application : Le canal téléphonique

$B = 300$  à  $3400$  Hz d'où  $BP = 3400 - 300 = 3100$  Hz

et  $R_{\max} = 2 BP = 6200$  bauds

Si  $S/N = 100$  alors :

$$C = BP \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = 3100 \log_2 (1 + 100) \approx 3100 \cdot 3.32 \log_{10} (100) = 20584 \text{ bits/s}$$

en pratique on sait faire : 14 400 bits/s pour les liaisons synchrones  
2400 bits/s pour les liaisons asynchrones.

Conclusion : La transmission en bande de base occupe la totalité de la bande passante du canal et interdit l'utilisation de techniques de multiplexage.

### • Optimisation de la transmission

Le multiplexeur est un équipement qui regroupe plusieurs voies de communication sur un même support. Le partage de la voie composite peut être :

- **par multiplexage temporel** : chaque voie utilise durant un temps déterminé la bande disponible (un IT)
- **par multiplexage fréquentiel** : chaque voie dispose d'une fraction de la bande disponible.

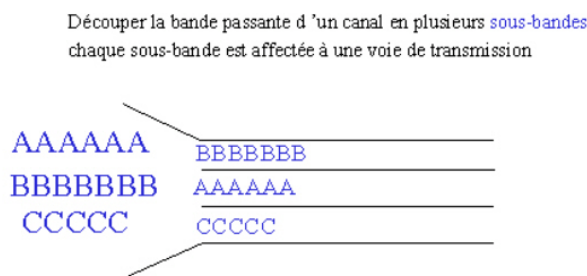


Figure 4 : Schéma de principe du multiplexage fréquentiel

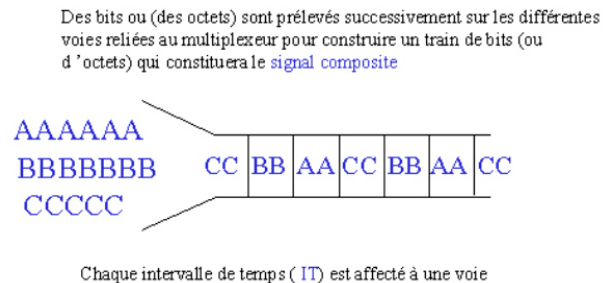


Figure 5 : Schéma de principe du multiplexage temporel

**Le concentrateur** regroupe aussi plusieurs entrées sur une voie composite, mais il dispose en plus de capacités de traitement et de stockage. Il peut prendre en compte simultanément plusieurs voies d'entrée. Il n'est pas transparent aux protocoles.

## 6. La chaîne de transmission numérique

Le schéma de base d'une chaîne de transmission numérique est présenté sur la figure suivante:

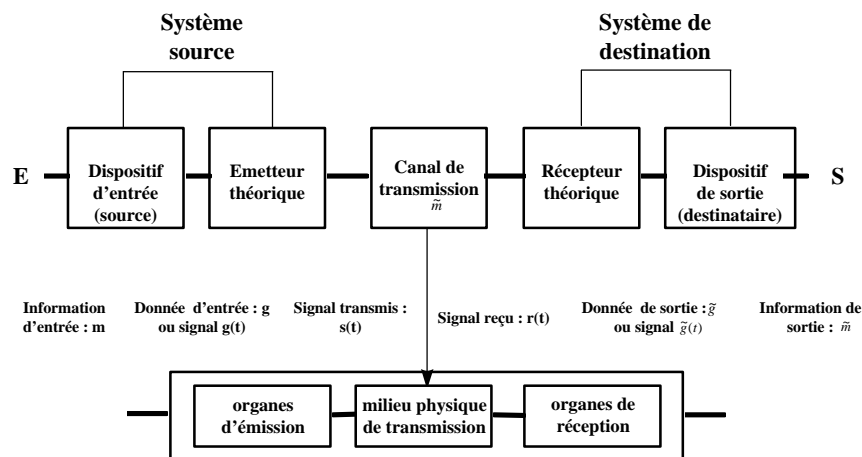


Figure 6 : Représentation fonctionnelle d'une chaîne de transmission de données

Cinq éléments principaux se distinguent :

- **la source** produit le message numérique à transmettre,
- **le destinataire** traite le message numérique reçu,
- **le canal de transmission** constitue le lien entre émetteur et récepteur,
- **l'émetteur** fournit le signal porteur du message qui doit transiter par le canal de transmission,
- **le récepteur** effectue l'opération inverse et délivre le message au destinataire.

Par ailleurs, on peut présenter la chaîne de transmission de la façon suivante :

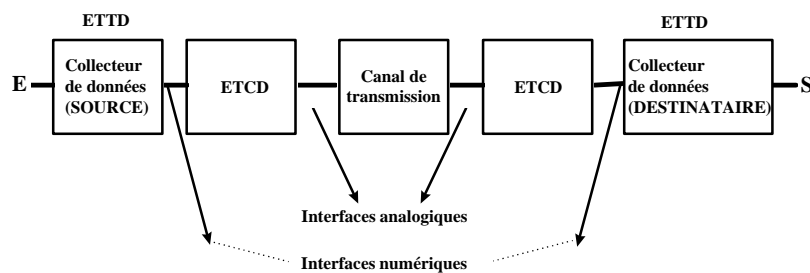


Figure 7 : Autre représentation d'une chaîne de transmission de données

Les différents éléments sont ainsi rassemblés :

- Les **ETTD, Equipement Terminal de Traitement de Données**, appelés aussi DTE (Data terminal Equipment) représentant les équipements d'extrémités intelligents. Ils sont dotés de circuits particuliers pour contrôler les communications. L'ETTD réalise la fonction de contrôle du dialogue.
- Les **ETCD, Equipement Terminal de Circuit de Données**, ou DCE (Data Circuit Equipment) sont les équipements qui réalisent l'adaptation entre les équipements d'extrémités et le canal de transmission. L'appellation de "terminal" recouvre tout type d'équipement susceptible de transmettre ou de recevoir des informations numériques, il peut désigner tout aussi bien une machine de traitement, par exemple un ordinateur, qu'une console d'entrée-sortie ou un télétype. Cet élément remplit essentiellement des fonctions électroniques, il modifie la nature du signal, mais pas sa signification.
- La **jonction** constitue l'interface entre ETTD et ETCD, elle permet à l'ETTD de gérer l'ETCD pour assurer le déroulement des communications (établissement du circuit, initialisation de la transmission, échange de données et libération du circuit).
- Le **canal (support) de transmission** est un élément essentiel de la liaison. Les possibilités de transmission (débit, taux d'erreurs ...) dépendent essentiellement des caractéristiques physiques et de l'environnement de celui-ci.

L'ETCD est souvent désigné par le terme de "**modem**", contraction de **modulateur-démodulateur**. L'adaptation au support nécessite souvent la modulation et la démodulation d'une fréquence porteuse et, comme la plupart des liaisons numériques sont bidirectionnelles, un ETCD comporte en général les deux fonctions.

L'ETCD est relié au support de transmission par l'intermédiaire d'une "interface analogique". Dans le cas de supports de type téléphonique, l'interface analogique fait l'objet d'une standardisation internationale de la part du CCITT, complétée par des spécifications nationales. Les avis du CCITT définissent les signaux appliqués à la ligne de transmission et leur relation



avec les données numériques transmises. Le CCITT a également standardisé l'interface "numérique" entre modem et terminal.

On propose de détailler le principe d'une chaîne de transmission de données comme le montre la figure suivante :

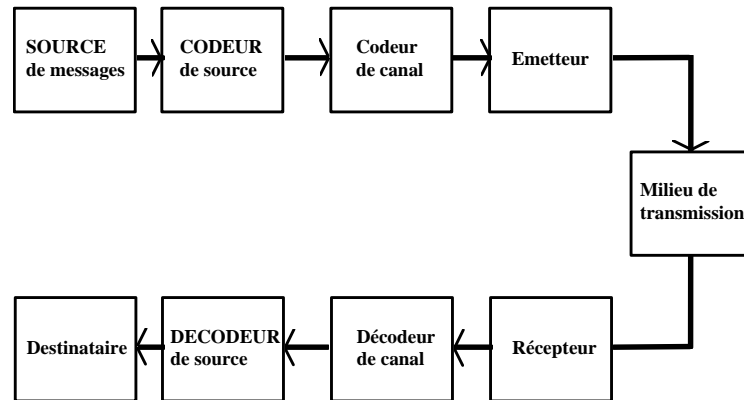


Figure 8 : Les éléments constitutifs d'une chaîne de transmission de données

### 6.1. La source de messages

Pour réaliser une transmission numérique, le message à transmettre doit être sous forme numérique. Si la source délivre un message analogique (parole en sortie d'un microphone, image en sortie d'une caméra), il faut le numériser. Cette numérisation s'effectue en échantillonnant le message analogique et en quantifiant les échantillons obtenus. En général, la source d'information est une donnée du problème de transmission. Il ne peut être question de la modifier, par contre il est indispensable de la modéliser.

Le modèle général est une source numérique qui délivre des symboles prenant leurs valeurs dans un alphabet fini ; celui-ci peut comprendre deux éléments (0 et 1, alphabet binaire) et plus généralement  $M$  éléments (alphabet  $M$ -aire). **La suite des symboles délivrés par la source constitue le message numérique à transmettre.**

### 6.2. Le codage de source

Le codage  $M$ -aire à signal permet l'adaptation du signal au canal de transmission sur lequel il est transmis. Le codage transforme le message numérique en un signal électrique. Ce signal électrique est en bande de base. Le codage de source permet de supprimer certains éléments peu significatifs du message ; le message est alors sous forme concise et constitué par une suite d'éléments binaires mutuellement indépendants et prenant les valeurs 0 et 1, avec des probabilités  $p_0$  et  $p_1$ . Dans la suite du cours, nous dirons que la source codée possède des éléments i-i-d, c'est à dire indépendants et identiquement distribués sur l'alphabet  $\{0,1\}$ . La source est caractérisée par son débit binaire  $D$ , défini comme le nombre d'éléments binaires émis par unité de temps.

### 6.3. Le codage de canal

Le codage de canal, aussi appelé codage détecteur et/ou correcteur d'erreurs, est une fonction spécifique des transmissions numériques, qui n'a pas son équivalent en transmission analogique. Cette opération permet d'améliorer la qualité de la transmission.

Le codage de canal consiste à insérer dans le message des éléments binaires, dits de redondance, suivant une loi donnée. Cette opération permet d'augmenter le débit binaire de la transmission.

Le décodeur de canal, qui connaît la loi de codage utilisée à l'émission, vient vérifier si cette loi est toujours respectée en réception. Si ce n'est pas le cas, il détecte la présence d'erreurs de transmission qu'il peut corriger sous certaines conditions.

La fonction de codage de canal n'est pas toujours utilisée, car elle accroît la complexité des équipements de transmission et donc leur coût.

#### 6.4. L'émetteur

Le message numérique, en tant que suite d'éléments binaires, est une grandeur abstraite. Pour transmettre ce message, il est donc nécessaire de lui associer une représentation physique, sous la forme d'un signal électrique. C'est la première fonction de l'émetteur appelée généralement **opération de modulation**.

Plus précisément, la modulation consiste à associer à chaque mot de  $n$  éléments binaires issu du message, un signal de durée  $T = nT_b$  choisi parmi  $M = 2^n$  états possibles. On définit la rapidité de modulation du signal, comme le nombre de signaux émis par unité de temps :

$$R = \frac{1}{T} \quad [\text{Bauds}]$$

On parle alors de transmission M-aire et la rapidité de modulation s'exprime en fonction du débit binaire par la relation :

$$R = \frac{D}{\log_2 M}$$

Le choix du type de signaux utilisés pour la modulation dépend évidemment des propriétés physiques du milieu de transmission que le signal va traverser ; l'émetteur assure donc aussi **une fonction d'adaptation du signal modulé au milieu de transmission**. L'émetteur peut aussi réaliser la fonction de filtrage pour limiter la bande du signal modulé et permettre ainsi à plusieurs utilisateurs de partager un même milieu de transmission sans risques d'interférences. L'émetteur peut réaliser la fonction de changement de fréquence pour centrer le signal modulé autour de la fréquence souhaitée.

#### 6.5. Le canal de transmission

Le propre d'une transmission est de se faire à distance ; il faut utiliser un milieu physique qui assure le lien entre la source et le destinataire et aussi un signal approprié au milieu choisi pour qu'il s'y propage correctement. Selon son contexte, le terme de canal de transmission possède des significations différentes.

Au sens de la propagation, le canal de transmission est la portion du milieu physique utilisée pour la transmission spécifique étudiée ; c'est le milieu de transmission.

Au sens de la théorie des communications, ce qui nous concernent ici, le canal de transmission peut inclure :

- le milieu de transmission,
- le bruit,
- et éventuellement le filtre d'émission placé physiquement dans l'émetteur,
- ainsi que les antennes d'émission et de réception pour les transmissions en espace libre.

Le milieu de transmission peut être constitué par l'un des supports suivants :

- **un câble bifilaire**, de bande passante faible et réservé pour les transmissions à bas débit (inférieur à 2 Mbits/s sur le réseau téléphonique)
- **un câble coaxial**, de bande passante plus importante et qui permet de réaliser des transmissions avec un débit relativement élevé (jusqu'à 565 Mbits/s sur le réseau téléphonique). Le câble

coaxial est notamment utilisé pour connecter les centraux téléphoniques entre lesquels transite un grand nombre de communications;

- **une fibre optique**, de bande passante très élevée et présentant une faible atténuation. Elle permet de transporter un débit allant jusqu'à plusieurs dizaines de Gbits/s. Les fibres optiques sont utilisées sur les liaisons entre centraux téléphoniques et abonnés

- **l'espace libre** utilise la propagation d'une onde électromagnétique dans l'atmosphère. Ce milieu est généralement réservé aux transmissions par satellite ou par faisceaux hertziens ainsi qu'aux communications avec les mobiles.

Types	Bande Passante	Utilisation
Paire Torsadée (TP)	> 100 kHz	Téléphonie, LAN (UTP, STP)
Câble coaxial	> 100 MHz	Télévision, LAN, (MAN ?)
Fibre Optique	> 1 GHz	LAN, MAN et WAN (monomode #50 km, Xmode #2 km)
Faisceaux Hertziens	Variable (nature et fréquence)	MAN, LAN
Satellites	X canaux > 10 MHz	WAN
LAN: Local Area Network      MAN: Metropolitan Area Netw.      WAN: Wide Area Network		

Figure 9 : Les différents supports de transmission et leurs applications

- **La modélisation du milieu de transmission** peut être complexe : le milieu peut se comporter comme :
  - un simple filtre linéaire de réponse en fréquence  $C(f)$  (figure 10)
  - un filtre linéaire non stationnaire ou la réponse  $C(f)$  est fonction du temps (figure 11),
  - un filtre présentant des non linéarités, ce que nous n'aborderons pas dans ce cours.

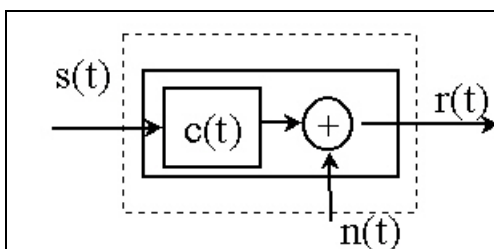


Figure 10 : Modélisation du canal de transmission par un filtre linéaire

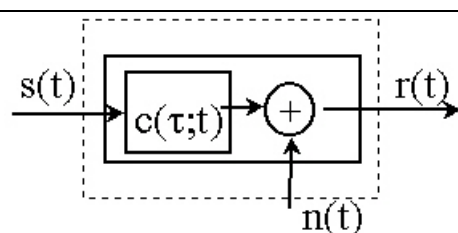


Figure 11 : Modélisation du canal de transmission par un filtre instationnaire

- **Le bruit** est une perturbation aléatoire qui a pour origines :
  - le milieu de transmission (bruit externe), c'est à dire les rayonnements divers captés par l'antenne, les interférences éventuelles entre différents utilisateurs, les bruits d'origine industrielle,
  - les dispositifs électroniques utilisés dans le récepteur (bruit interne), c'est à dire le mouvement brownien des électrons.

On distingue deux types de transmission sur le canal :

- **les transmissions en bande de base** où la bande de fréquence  $B$  allouée à la transmission du signal numérique est comprise entre une fréquence égale ou proche de zéro et une fréquence  $f$ .

On parle de **codage en ligne** dans ce cas.

- **les transmissions sur onde porteuse** où la bande  $B$  allouée à la transmission est centrée autour d'une fréquence  $f_0$ . On réserve plutôt le terme de **modulation** pour les transmissions sur onde porteuse.

#### 6.6. Le récepteur

Le récepteur a pour fonction de reconstituer le signal émis par la source à partir du signal reçu. Il comprend :

- des circuits d'amplification,
- de changement de fréquence et de démodulation pour les transmissions sur onde porteuse,
- de filtrage,
- d'échantillonnage,
- de prise de décision.

L'échantillonnage est effectué à des instants caractéristiques pour minimiser l'influence du bruit.

**Chapitre 2 : LES TECHNIQUES DE CODAGE D'UN SIGNAL NUMERIQUE :  
LES CODES EN LIGNE**

**Le codage à la source** est l'opération qui fait correspondre à un symbole appartenant à l'alphabet une représentation binaire. **Le codage en ligne** est l'opération qui consiste à substituer au signal numérique un signal électrique mieux adapté à la transmission.

**On peut considérer que le codage se compose :**

- **d'une règle de codage proprement dite** qui permet d'associer à la suite initiale d'éléments appartenant à l'alphabet  $I = \{I_0, I_1, \dots, I_{q-1}\}$ , une autre suite appartenant à un autre alphabet  $C = \{C_0, C_1, \dots, C_{M-1}\}$ .
- **d'une mise en forme électrique** faite par une correspondance bi-univoque entre les  $C_k$  et les impulsions  $e_k(t)$ . La valeur  $C_k$  associé à la suite est transmise à l'instant  $kT$  par l'impulsion  $e_k(t - kT)$  d'énergie finie et prenant des valeurs réelles (ou complexes) et dont la probabilité est  $p_k$ . L'impulsion est une variable aléatoire. Finalement le codage fait correspondre au message initial le signal  $e(t)$  :

$$e(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} e_k(t)$$

### 1. Les critères de choix d'un code en ligne

Le code en ligne doit d'abord être choisi pour assurer la compatibilité **entre le débit D à transmettre et la bande passante du milieu de transmission**, choix conditionné par le nombre d'états M.

Par le choix d'une méthode de codage appropriée, on peut incorporer au signal certaines caractéristiques avantageuses :

- **modification du spectre de puissance** pour une meilleure adaptation au support de transmission, notamment la suppression de la composante continue lorsque le support comporte des transformateurs d'isolement
- **annulation de l'énergie à certaines fréquences** pour l'introduction de fréquences pilotes, de canaux de transmission supplémentaires ou pour limiter la bande occupée par le signal
- **augmentation du nombre de transitions** dans le but d'améliorer la transmission de l'horloge associée aux données
- **utilisation de la redondance intrinsèque au code** pour la détection des erreurs, certaines successions d'états étant interdites par la loi de codage ; leur présence indique en effet l'existence d'une erreur de transmission.

Il est donc nécessaire de savoir déterminer la densité spectrale de puissance d'un code en ligne. Parmi les différents codes, on souligne qu'un code comme le NRZ ne présente pas de redondance, les autres codes introduisent une redondance soit sous la forme d'une augmentation du nombre de niveaux (codes bipolaires, duobinaires ...), soit sous la forme d'une augmentation de la rapidité de transmission (codes biphase, de Miller ...). Il faut remarquer que l'augmentation du nombre de niveaux (code bipolaire) ou l'augmentation de la bande occupée par le signal (code biphase) contribue à diminuer l'immunité au bruit par rapport au code binaire NRZ.

La sélection d'une méthode de codage consiste donc à **rechercher le meilleur compromis** entre certains des avantages cités auparavant et la dégradation du rapport signal à bruit pour lequel des erreurs vont commencer à apparaître. Ce compromis dépend avant tout du support de transmission.

## 2. Expression de la densité spectrale de puissance d'un code en ligne

Les signaux transmis dans le canal ont des propriétés qui dépendent du format utilisé. Pour étudier et tracer l'occupation spectrale de ces signaux, il faut calculer la densité spectrale de puissance pour obtenir des informations sur le spectre du signal ; en effet, les signaux étant aléatoires, on ne peut calculer de transformée de Fourier.

- On rappelle que le codage consiste à associer à chaque élément binaire  $\alpha_k$  du message, un signal  $S_i(t)$  de durée  $T_b$  choisi parmi un ensemble de deux signaux, fonction de la valeur binaire  $\alpha_k$ .

$$S_i(t) = 0 \quad \forall t \notin [0, T_b[ \quad i = 0,1$$

$$\begin{cases} \text{si } \alpha_k = 0 & \text{émission du signal } S_0(t - kT_b) \\ \text{si } \alpha_k = 1 & \text{émission du signal } S_1(t - kT_b) \end{cases}$$

Pour l'ensemble des  $\{\alpha_k\}$ , on obtient le signal  $e(t)$  :

$$e(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} S_{i(k)}(t - kT_b) \quad ; \quad i(k) = 0,1$$

avec :  $S_i(t) = A_i h(t)$  ;  $i = 0,1$

$$\text{d'où : } e(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} A_{i(k)} h(t - kT_b) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k h(t - kT_b)$$

On parle de modulation d'impulsion en amplitude (MIA) ou PAM en anglo-américain.

- Le signal  $e(t)$  en sortie du codeur peut être interprété comme le résultat du filtrage d'un signal  $a(t)$  par un filtre de réponse impulsionnelle  $h(t)$  :

$$e(t) = (a \otimes h)(t)$$

avec :  $a(t) = \sum_k a_k \delta(t - kT_b)$

- La densité spectrale de puissance (DSP) du signal aléatoire  $e(t)$  :

$$\gamma_e(f) = \gamma_a(f) |H(f)|^2$$

avec :  $H(f)$  la transformée de Fourier de la forme d'onde  $h(t)$

$\gamma_a(f), \gamma_e(f)$  les densités spectrales de puissance de  $a(t)$  et  $e(t)$ , transformées de Fourier des fonctions d'autocorrélation  $\Gamma_a(\tau)$  et  $\Gamma_e(\tau)$ ,

$$\Gamma_a(\tau) = E[a(t)a^*(t-\tau)].$$

- Dans le cas de symboles  $a_k$  corrélés, on trouve :

$$\gamma_a(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_b} + \frac{2\sigma_a^2}{T_b} \sum_{k=1}^{\infty} \Gamma'_a(k) \cos(2\pi k f T_b) + \frac{m_a^2}{T_b} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(f - \frac{k}{T_b})$$

la moyenne  $m_a = E[a_n]$

la variance  $\sigma_a^2 = E[(a_n - m_a)^2] \quad \forall n$

la fonction d'autocorrélation  $\Gamma_a(k) = \frac{E[(a_n - m_a)(a_{n-k} - m_a)]}{\sigma_a^2} \quad \forall n, k$

et donc :

$$\gamma_e(f) = \frac{\sigma_a^2}{T} |H(f)|^2 + \frac{2\sigma_a^2}{T} |H(f)|^2 \sum_{k=1}^{\infty} \Gamma_a(k) \cos(2\pi k f T_b) + \frac{m_a^2}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left| H\left(\frac{k}{T}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{k}{T}\right)$$

et  $T$  est définie de façon générale comme la période symbole  $T = nT_b$  dans le cas où un symbole est formé de  $n$  éléments binaires. Dans le cas d'éléments binaires,  $T = T_b$ .

Remarques : - le spectre est formé de raies aux fréquences  $k/T$ .

-  $h(t)$  représente la forme d'onde du signal numérique

- la détermination du spectre du signal numérique impose de connaître les propriétés statistiques des symboles  $\{a_k\}$  ; en choisissant  $h(t)$  et en introduisant de la corrélation entre les symboles  $\{a_k\}$ , la DSP du code en ligne pourra satisfaire certaines contraintes comme :

- annuler ou faire apparaître des raies à certaines fréquences,
- imposer une décroissance en  $1/f^2$  ou  $1/f^4$  à l'enveloppe.

• **On peut classer les codes en ligne (ou codes de source) de différentes façons :**

a) **selon leur format** : RZ (Retour à zéro) ou NRZ (Non Retour à Zéro)

b) **selon leurs propriétés statistiques** : codes à symboles **indépendants** (**NRZ, RZ, biphasé binaire (Manchester)**) ou codes à symboles dépendants (**bipolaire, HDB<sub>n</sub>**) ; c'est cette dernière classification que nous allons utiliser.

• **Puissance moyenne et énergie d'un signal binaire :**

La puissance moyenne du signal  $e(t)$  est définie par :  $P_m = E[e^2(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma_e(f) df$

Son énergie moyenne est :  $E_m = P_m T$  sachant que la durée d'un symbole constitué de  $n$  bits est  $T = nT_b$ .

L'énergie nécessaire pour transmettre un élément binaire est :  $E_b = P_m T_b$

3. Les codes en ligne à symboles indépendants

Dans ce cas, les symboles  $\{a_k\}$  sont indépendants et donc la fonction de corrélation  $\Gamma_a(k) = 0 \quad \forall k \neq 0$ . On considère qu'il y a équiprobabilité dans le nombre d'apparition des niveaux logiques 0 et 1, c'est à dire que la probabilité d'apparition du niveau logique 1 est égale à celle du niveau logique 0.

La densité spectrale de puissance des symboles  $\{a_k\}$  s'exprime alors sous une forme simplifiée :

$$\gamma_a(f) = \frac{\sigma_a^2}{T_b} + \frac{m_a^2}{T_b} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f - \frac{k}{T_b}\right)$$

Le premier terme constitue la partie continue du spectre qui ne dépend que de la variance  $\sigma_a^2$ , le second terme constitue la partie discrète.

Les principaux codes à symboles indépendants sont désormais étudiés.

### 3.1. Le code NRZ (Non Return to Zero)

Le plus simple est d'utiliser deux niveaux de tension pour les deux bits de valeurs 0 et 1. Le niveau de tension doit être constant pendant toute la durée d'émission d'un bit. Il n'y a pas de tension nulle et souvent pour le bit 0, on choisit une tension négative (ou alors pas de tension du tout) et pour le bit 1 une tension positive. Il n'y a pas de transition, c'est à dire des passage à la tension nulle.

- La version la plus simple est le code **NRZ-L** (L pour Level) :

On associe à chaque élément  $\alpha_k$  un symbole  $a_k$  tel que :

$$\begin{cases} a_k = 1 & \text{si } \alpha_k = 1 \\ a_k = -1 & \text{si } \alpha_k = 0 \end{cases}$$

La forme d'onde  $h(t)$  de durée  $[0, T_b[$  est définie de la façon suivante :

$$h(t) = \begin{cases} V & \forall t \in [0, T_b[ \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

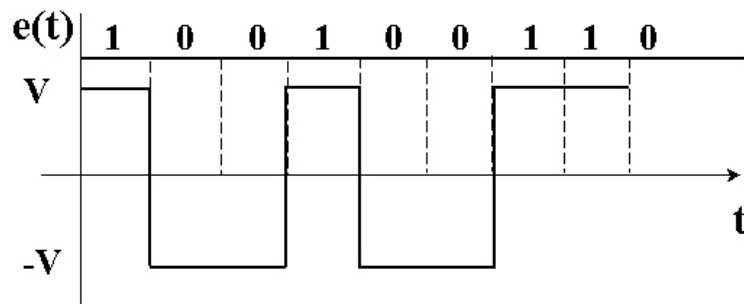


Figure 12 : Chronogramme du code NRZ binaire

Compte tenu des propriétés statistiques :

$$m_a = 0$$

$$\sigma_a^2 = 1$$

La densité spectrale de puissance a pour expression :

$$\boxed{\gamma_s(f) = V^2 T_b^2 \left[ \frac{\sin(f T_b)}{f T_b} \right]^2 = V^2 T_b^2 \operatorname{sinc}^2(f T_b)}$$



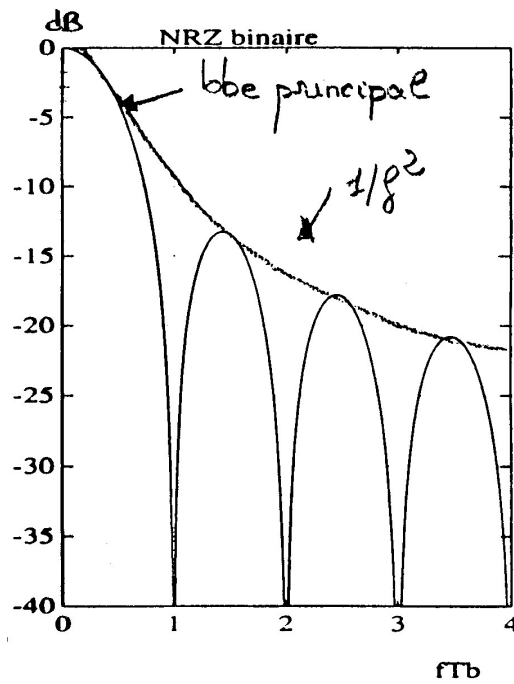
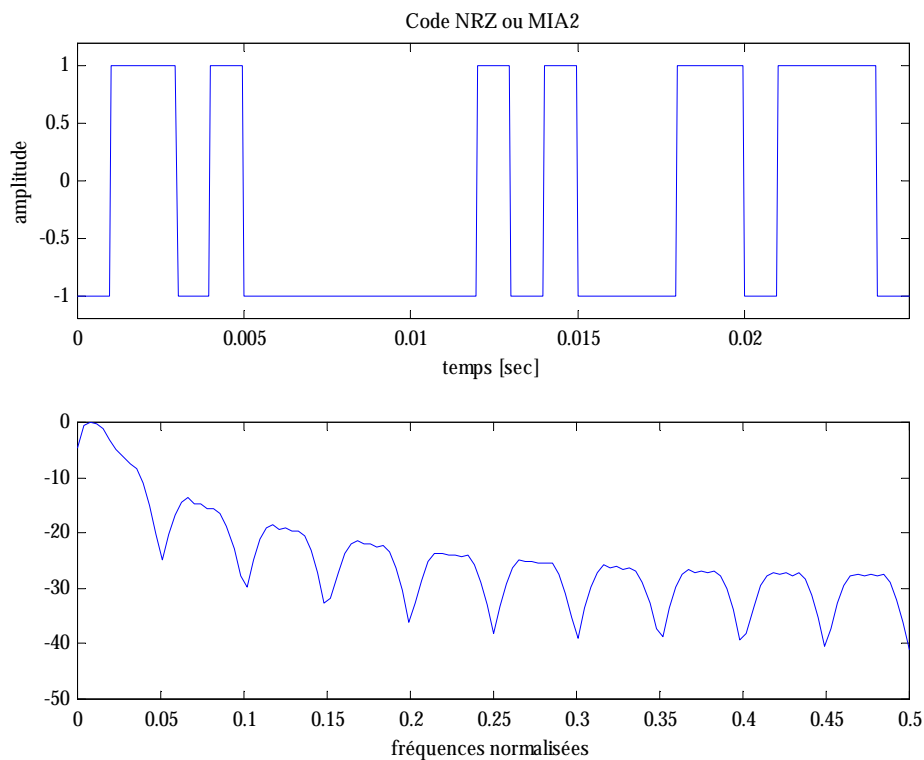


Figure 13 : Densité spectrale de puissance du code NRZ binaire



Figures 12 bis et 13bis : Chronogramme et densité spectrale de puissance du code NRZ binaire (simulations avec Matlab)

On remarque que le spectre du signal numérique est principalement contenu dans le domaine  $[0; F_b]$ . Le signal polaire NRZ a une forte densité spectrale de puissance dans les basses fréquences et notamment dans le continu. Cette particularité peut être pénalisante si le support de transmission ne laisse pas passer la composante continue.

De plus, ce format ne présente aucune raie spectrale à la fréquence rythme ou fréquence de bits ; il est donc difficile de récupérer le signal d'horloge.

- **Le code NRZ-M-aire**

Désormais, on a  $n$  éléments et on leur associe un alphabet à  $M = 2^n$  éléments :

$$A = \{\pm 1; \pm 3; \pm 5; \pm (2p+1); \dots; \pm (M-1)\}$$

Il y a un message avec  $n$  bits d'information.

Compte tenu des propriétés statistiques :

$$m_a = 0$$

$$p_i = \frac{1}{M} \text{ pour chaque élément}$$

$$\sigma_a^2 = \frac{2}{M} \sum (2p+1)^2 = \frac{M^2-1}{3}$$

La densité spectrale de puissance a pour expression :

$$\gamma_e(f) = \frac{M^2-1}{3} V^2 T \sin^2(fT)$$

Démonstration :

- Aux symboles  $A = \{\pm 1; \pm 3; \pm 5; \pm (2p+1); \dots; \pm (M-1)\}$  ont peut associer  $\{+1; +2(-1); +3; +4(-3); \dots; +(M-1); +M\}$  donc au total, il y a M symboles.

- On va montrer que :  $\sigma_a^2 = E[a^2] - \underbrace{E^2[a]}_0 = \frac{2}{M} \sum_{p=0}^{M/2} (2p+1)^2 = \frac{M^2-1}{3}$ .

En effet :

$$\sum_{p=0}^{M/2} (2p)^2 + \sum_{p=0}^{M/2-1} (2p+1)^2 = \sum_{p=0}^M p^2 = \frac{M(M+1)(2M+1)}{6}$$

$$4 \sum_{p=0}^{M/2} p^2 + \underbrace{\sum_{p=0}^{M/2-1} (2p+1)^2}_S = \frac{M(M+1)(2M+1)}{6}$$

$$4 \frac{M/2(M/2+1)(M+1)}{6} + S = \frac{M(M+1)(2M+1)}{6}$$

$$S = \frac{1}{6} [-M(M+2)(M+1) + M(M+1)(2M+1)]$$

$$S = \frac{1}{6} M(M+1)(M-1) = \frac{1}{6} M(M^2-1)$$

$$\sigma_a^2 = \frac{2}{M} \left[ \frac{1}{6} M(M^2-1) \right] = \frac{M^2-1}{3}$$

- D'après la figure 14, on remarque que le lobe principal de la DSP occupe la bande  $[-1/T_b; 1/T_b]$  suivi d'une infinité de lobes secondaires. Pour les codes NRZ, il y a toujours l'annulation du spectre aux fréquences  $k/T_b$  et l'enveloppe décroît en  $1/f^2$ .

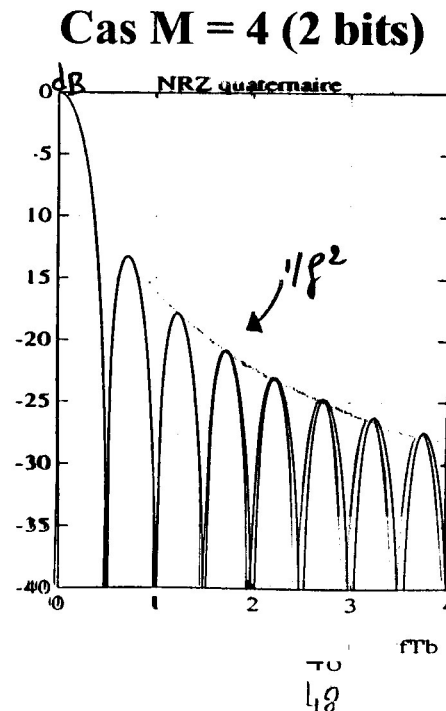


Figure 14 : Densité spectrale de puissance du code NRZ quaternaire (M=4)

### 3.2. Le code RZ (Return to Zero) binaire

On associe à chaque élément binaire  $\alpha_k$  du message un symbole  $a_k$  :

$$\begin{cases} a_k = 1 & \text{si } \alpha_k = 1 \\ a_k = 0 & \text{si } \alpha_k = 0 \end{cases}$$

La forme d'onde  $h(t)$  est un signal rectangulaire d'amplitude  $V$  de durée  $[0, \lambda T_b[$   $0 < \lambda \leq 1$  suivie d'un retour à zéro de durée  $(1 - \lambda)T_b$  :

$$h(t) = \begin{cases} V & \forall t \in [0, \lambda T_b[ \\ 0 & \forall t \in [\lambda T_b, T_b[ \end{cases}$$

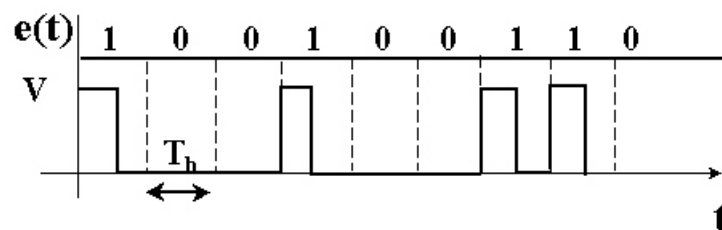


Figure 15 : Chronogramme d'un signal RZ ( $\lambda=1/2$ )

Compte tenu des propriétés statistiques :

$$m_a = \frac{1}{2}$$

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{4}$$

La densité spectrale de puissance a pour expression :

$$\gamma_e(f) = \frac{V^2 \lambda^2 T_b}{4} \left[ \frac{\sin(\pi f \lambda T_b)}{\pi f \lambda T_b} \right]^2 + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{V^2 \lambda^2}{4} \left[ \frac{\sin(\pi k \lambda)}{\pi k \lambda} \right]^2 \delta\left(f - \frac{k}{T_b}\right)$$

Avec  $\lambda=0,5$ , les raies sont à  $(2k+1)/T_b$  :

$$\gamma_e(f) = \frac{V^2 T_b}{16} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{fT_b}{2}\right) + \frac{V^2}{16} \delta(f) + \sum_{k \neq 0} \frac{V^2 \lambda^2}{4\pi^2} \frac{2}{(2k+1)^2} \delta\left(f - \frac{2k+1}{T_b}\right)$$

Dans ce dernier cas, il y a une raie en  $1/T_b$ , ce qui facilite la récupération du rythme de la transmission en réception.

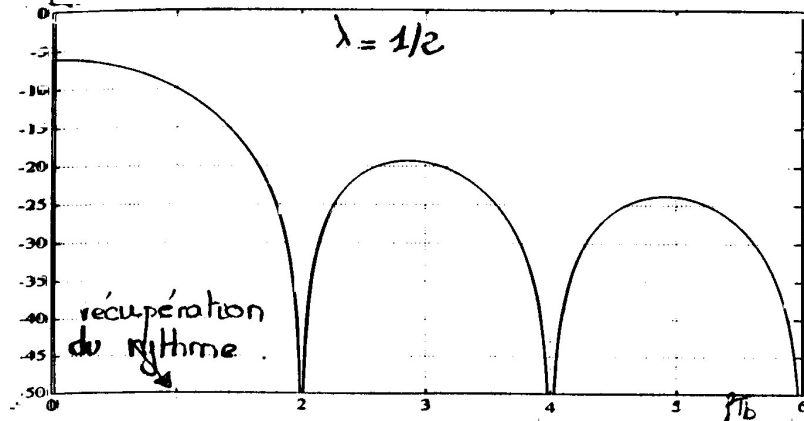
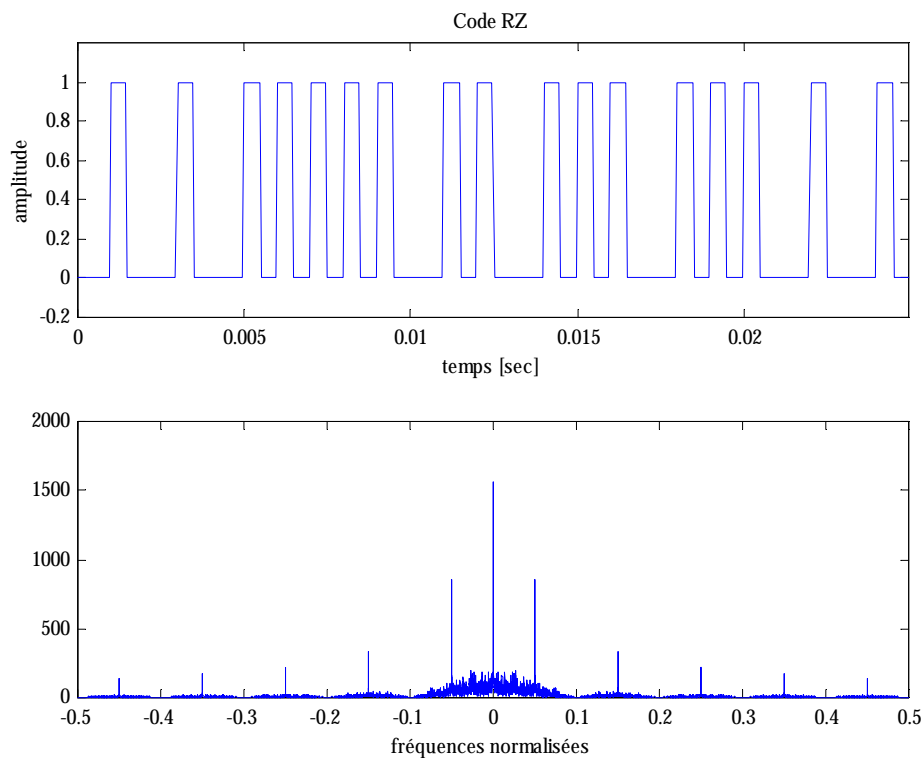


Figure 16 : Densité spectrale de puissance du code RZ pour  $\lambda=1/2$



Figures 15bis et 16bis : Chronogramme et densité spectrale de puissance du code RZ pour  $\lambda=1/2$  (simulations avec Matlab)

### 3.3. Le code binaire biphasé (code Manchester)

La règle de codage est la même que celle du code NRZ-binaire :

$$\begin{cases} a_k = 1 & \text{si } \alpha_k = 1 \\ a_k = -1 & \text{si } \alpha_k = 0 \end{cases}$$

La forme d'onde  $h(t)$  est définie de la façon suivante :

$$h(t) = \begin{cases} V & \forall t \in \left[0, \frac{T_b}{2}\right[ \\ -V & \forall t \in \left[\frac{T_b}{2}, T_b\right[ \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

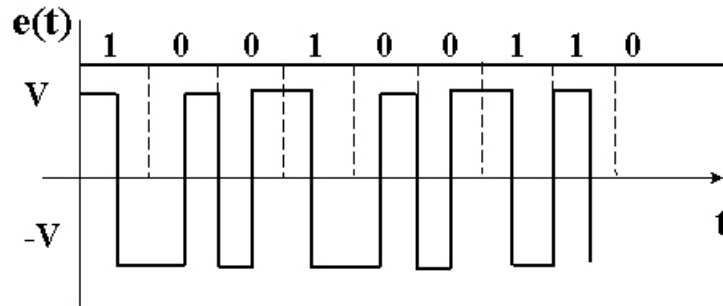


Figure 17 : Chronogramme d'un signal codé avec le code Manchester

Compte tenu des propriétés statistiques :

$$m_a = 0$$

$$\sigma_a^2 = 1$$

La densité spectrale de puissance a pour expression :

$$\gamma_e(f) = V^2 T_b \sin^2\left(\frac{\pi f T_b}{2}\right) \sin^2\left(\frac{f T_b}{2}\right)$$

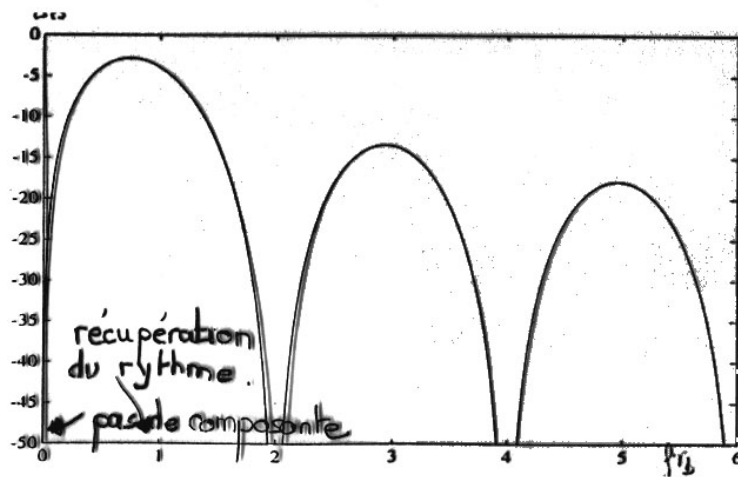


Figure 18 : Densité spectrale de puissance du code Manchester

On remarque que la DSP ne présente cette fois ci pas de puissance en  $f=0$ . On peut ainsi transmettre sur le même fil la tension d'alimentation et le signal contenant l'information. Le spectre est centré autour de  $0,74 F_b$ .

Il y a toujours des transitions  $-V \rightarrow +V$  ou inversement, et ceci quelque soit la valeur 0 ou 1 prise par les éléments binaires  $\alpha_k$  ; ces transitions sont de nature à faciliter la récupération du rythme en réception. On peut ainsi récupérer à l'aide d'un filtre sélectif l'horloge de bits. Ce format est utilisé notamment dans la norme IEEE MAC802.3 (Ethernet).

### 3.4. Conclusion sur les codes en ligne à symboles indépendants

Pour ce type de codes, la forme d'onde  $h(t)$  est le seul degré de liberté pour agir sur la partie continue de la DSP du code. On peut introduire de la corrélation entre symboles  $a_k$ , ce qui donne un autre degré de liberté et permet ainsi d'obtenir une annulation du spectre en  $f=0$ , par exemple.

#### 4. Les codes en ligne à symboles dépendants

Pour ces codes en lignes, les symboles  $a_k$  ne sont plus indépendants et pourtant, la source de messages est toujours à éléments indépendants et identiquement distribués (i-i-d). L'exemple le plus fondamental concerne le code AMI (Alternate Marked Inversion) ou code "bipolaire".

##### 4.1. Le code bipolaire (AMI) (USA+Canada)

Auparavant, le code biphase donne un signal à deux niveaux et l'annulation de la composante continue est obtenue en subdivisant l'intervalle binaire  $T_b$  en demi intervalles et en autorisant le fait que ces demi intervalles puissent être codés avec des polarités différentes. Un autre procédé consiste à introduire dans le signal un troisième niveau d'amplitude nulle. La corrélation des symboles  $\{a_k\}$  est réalisée en affectant alternativement les valeurs  $+1$  et  $-1$  aux symboles  $\{a_k\}$  lorsque l'élément binaire  $\alpha_k$  est égal à 1.

Voici la règle de codage :

$$\begin{cases} a_k = \pm 1 & \text{si } \alpha_k = 1 \\ a_k = 0 & \text{si } \alpha_k = 0 \end{cases}$$

Les propriétés statistiques sont :

$$m_a = 0$$

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{2}$$

La forme d'onde  $h(t)$  a pour expression :

$$h(t) = \begin{cases} V & \forall t \in \left[0, \frac{T_b}{2}\right[ \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

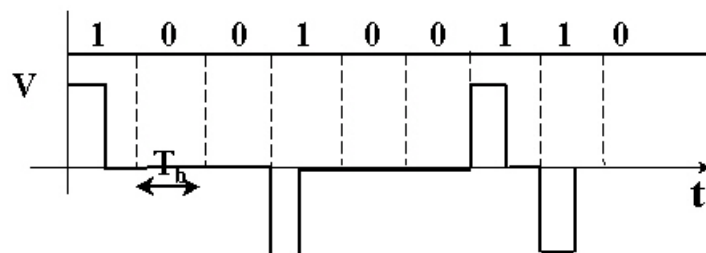


Figure 19 : Chronogramme du code bipolaire RZ

- La fonction d'autocorrélation du code bipolaire

$\Gamma_a(k) = E[a_n, a_{n \pm k}]$  la fonction étant paire

$$\begin{cases} P_r(a_k = -1) = P_r(a_k = 1) = \frac{1}{4} \\ P_r(a_k = 0) = \frac{1}{2} \end{cases}$$

$$P_r(a_k = 1 | a_{k-1} = -1) = P_r(a_k = -1 | a_{k-1} = 1) = \frac{1}{2}$$

**a) Calcul de la variance**

$$E[a_k^2] = (1)^2 \times \frac{1}{4} + (-1)^2 \times \frac{1}{4} + 0 \times \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

**b) On calcule la fonction d'autocorrélation normalisée  $\Gamma_a(k)$  dans le cas  $k=1$  et on généralise pour  $k$  quelconque.**

**b1)** C'est seulement quand  $k=1$  que les réalisations  $a_n = 1$  et  $a_n = -1$  apportent une contribution non nulle dans le calcul de  $\Gamma_a(1)$ .

On a :

$$E[a_n a_{n+1}] = (1) \cdot (-1) P_r(a_n = 1, a_{n+1} = -1) + (-1) \cdot (1) P_r(a_n = -1, a_{n+1} = +1)$$

Les combinaisons possibles sont les suivantes :

0 0  $\rightarrow$  0 (produit)

0 1  $\rightarrow$  0

0 -1  $\rightarrow$  0

1 0  $\rightarrow$  0

1 -1  $\rightarrow$  -1 de probabilité 1/8

-1 0  $\rightarrow$  0

-1 1  $\rightarrow$  -1 de probabilité 1/8

-1 -1 ou 1 1 combinaisons impossibles à cause de la règle d'alternance

Sachant que :  $P_r(A|B) = \frac{P_r(AB)}{P_r(B)}$

$$P_r(AB) = P_r(A|B) P_r(B)$$

et  $\sum P(A_i|B_i) = 1$

$$P_r(1 \text{ et } -1) = P_r(1|-1) \cdot P_r(-1) = \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{8}$$

$$\Gamma_a(1) = \frac{2}{8}(1) \cdot (-1) + \frac{2}{8}(-1) \cdot (1) = -\frac{1}{2} \text{ en normalisant par rapport à } \sigma_a^2 = \frac{1}{2}.$$

**b2)** On utilise la même démarche pour  $k$  quelconque, différent de 1 et on montre que :

$$\Gamma_a(k \neq 1) = 0 \quad \forall |k| \geq 2$$

par exemple pour  $k=2$  :

$a_k$	$a_{k+1}$	$a_{k+2}$	produit
0	0	0	0
1	0	-1	-1
-1	0	1	-1
1	-1	1	1
-1	1	-1	1

On arrive à la conclusion qu'il y a autant de produits de valeur +1 que de produits de valeur -1 et les probabilité sont égales ; la fonction d'autocorrélation est donc nulle.

Finalement on déduit que la DSP des symboles  $\{a_k\}$  s'exprime ainsi par :

$$\gamma_a(f) = \frac{1}{2T_b} + \frac{1}{T_b} \left( -\frac{1}{2} \right) \cos(2\pi f T_b) = \frac{1}{T_b} \sin^2(\pi f T_b)$$

On remarque que pour  $f=0$ ,  $\gamma_a(f) = 0$ .

Et pour le signal numérique :

$$\gamma_e(f) = \frac{V^2 T_b}{4} \sin^2(\pi f T_b) \operatorname{sinc}^2\left(\frac{f T_b}{2}\right)$$

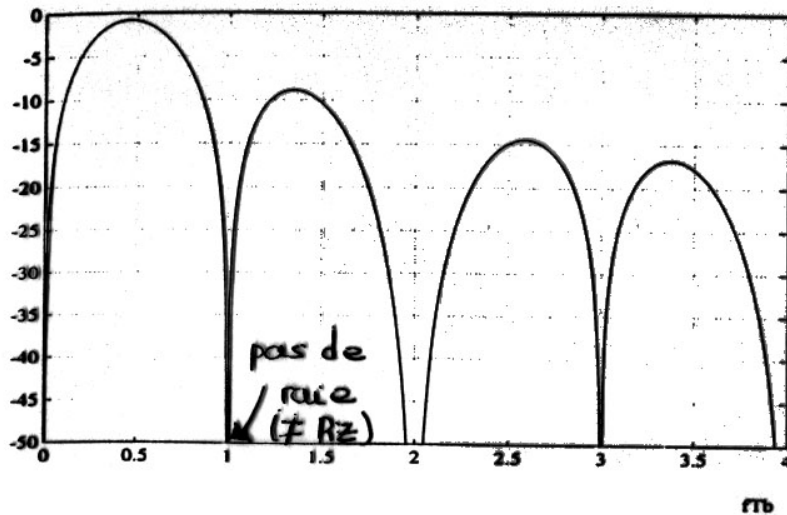


Figure 20 : Densité spectrale de puissance du code bipolaire RZ en dB pour une puissance moyenne de code  $P_m=1$

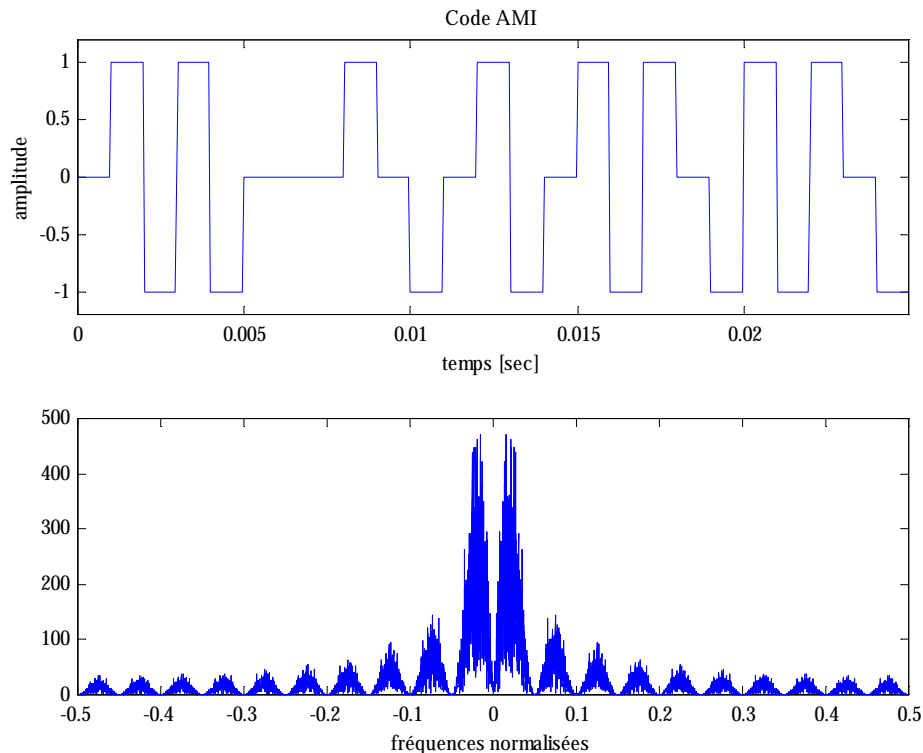
**b3)** On montre que si la somme  $S_c(n)$  des symboles  $\{a_k\}$  d'un code en ligne :

$$S_c(n) = \sum_{k=-n}^n a_k$$

est bornée quelque soit  $n$ , alors sa densité spectrale de puissance est nulle en  $f=0$ .

Pour le code bipolaire  $S_c(n) = \begin{cases} -1 \\ 0 \\ 1 \end{cases}$  et ceci quelle que soit la valeur de l'indice  $n$  ; le code bipolaire est donc un code à somme bornée.





Figures 19bis et 20bis : Chronogramme et densité spectrale de puissance du code bipolaire RZ (simulations avec Matlab)

**b4) Remarques :** On note que la récupération du rythme de la transmission à partir du code RZ bipolaire est assez simple à réaliser ; il faut effectuer un redressement double alternance du code bipolaire, ce qui permet d'obtenir un code RZ binaire possédant une raie à la fréquence  $1/T_b$  dans sa densité spectrale de puissance. **La présence d'une raie à  $f=1/T_b$  suppose la stationnarité des éléments binaires  $\alpha_k$  du message**, c'est à dire un nombre équilibré de 0 et de 1. En pratique, il se peut que le message à transmettre contienne une très longue suite de 0 si bien que le signal résultant est nul pendant un long intervalle de temps. Alors, l'amplitude de la raie décroît fortement et la puissance du signal recueilli après filtrage peut devenir insuffisante pour assurer la récupération du rythme de la transmission ; le récepteur perd alors la synchronisation.

Il a donc été imaginé un code qui possède les avantages du code bipolaire :

- la détection d'erreurs par le contrôle de la somme courante  $S_c(n)$
- pas de raie à  $f=0$  (avantage pour la téléalimentation)
- une densité spectrale de puissance nulle en  $f=0$  (code à somme bornée)
- la récupération aisée du rythme grâce à la raie en  $1/T_b$

Le code HDBn (Haute densité Bipolaire d'ordre n) a été développé car il ne comporte pas l'inconvénient cité plus haut.

#### 4.2. Le code HDBn (Haute densité Bipolaire d'ordre n) (Europe)

Ce code, dérivé du code bipolaire, interdit plus de n symboles successifs nuls ; le (n+1) ème élément binaire  $\alpha_k$  d'une suite de (n+1) zéros successifs est codé par un symbole  $a_k$  égal à  $\pm 1$ , le signe étant choisi de telle manière qu'il viole la règle d'alternance. On impose aux "viols" de

satisfaire la règle d'alternance entre eux (ceci pour éviter l'apparition de symboles  $\{\alpha_k\}$  de moyenne non nulle);

Mais, il se peut que le récepteur ne puisse pas reconnaître un symbole d'un viol (de signe contraire au 1 précédent), alors on code le premier 0 de la suite de (n+1) zéros consécutifs avec un symbole  $a_k = \pm 1$ , du même signe que le viol qui lui succède ; ce symbole est appelé "symbole de bourrage".

Par exemple, voici l'algorithme du code HDB3, beaucoup utilisé en Europe et au Japon :

B=symbole de bourrage (B+, B-)

V=symbole de viol (V+, V-)

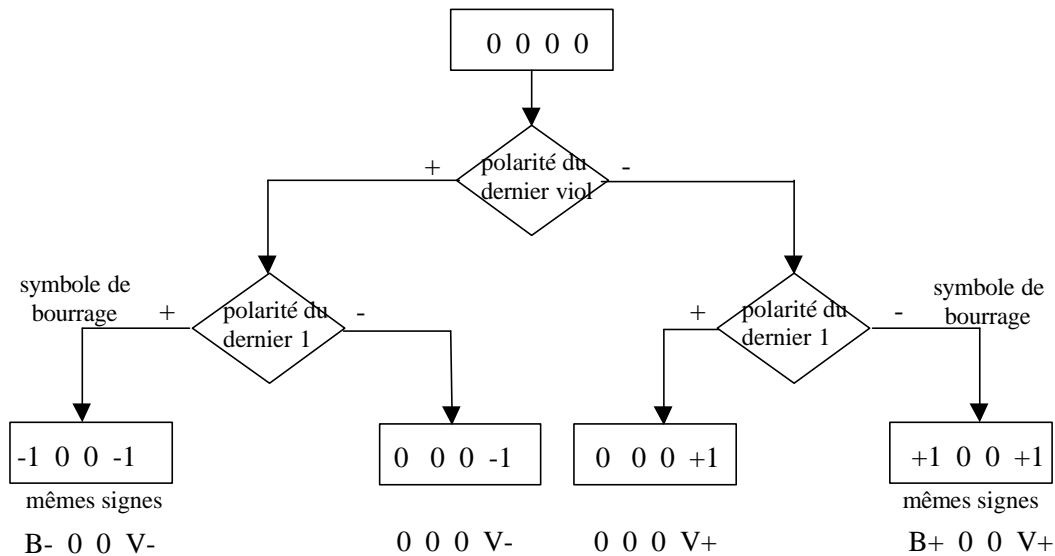


Figure 21 : Algorithme du code HDB<sub>3</sub>

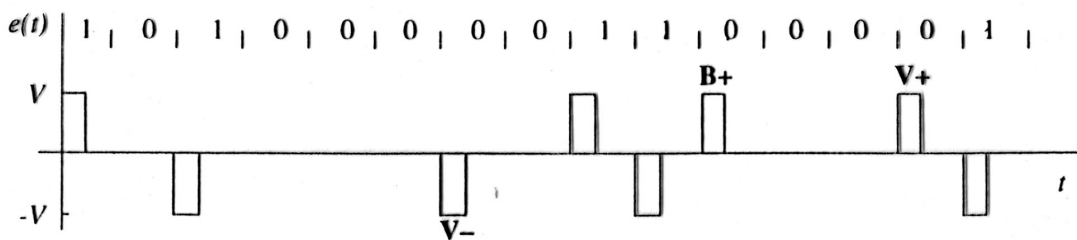


Figure 21: Chronogramme du code HDB<sub>3</sub>

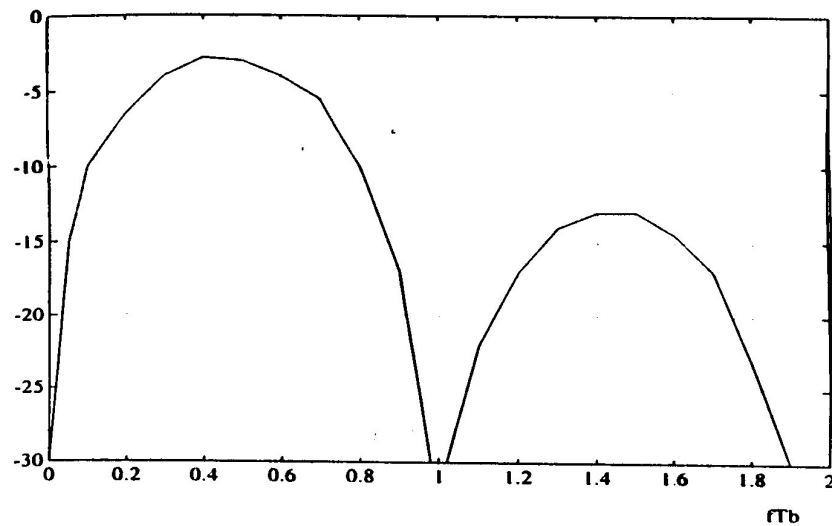
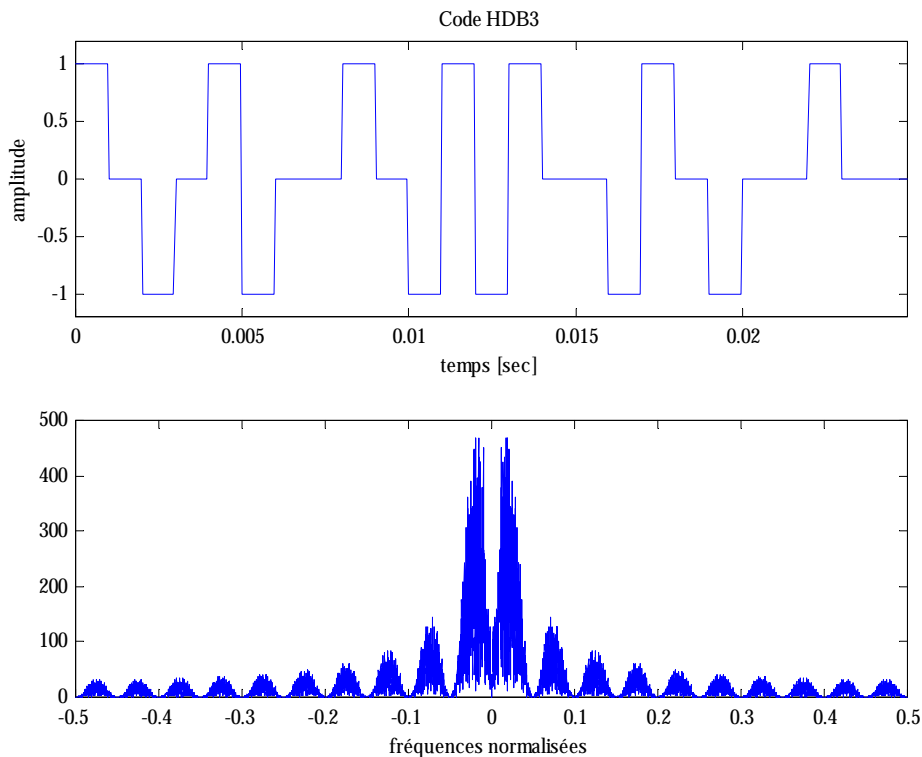


Figure 22 : Densité spectrale de puissance du code  $HDB_3$



Figures 21bis et 22bis : Chronogramme et densité spectrale de puissance du code  $HDB_3$

Ainsi, les symboles sont toujours de moyenne nulle. La densité spectrale de puissance est continue. On remarque que la modification de la règle de codage des symboles  $\{\alpha_k\}$  a très peu d'influence sur la forme de la DSP ce code bipolaire particulier.

Ce type de code est utilisé pour les transmissions téléphoniques numériques (MIC). Ces codes sont souvent utilisés dans les transmissions numériques en bande de base car ils assurent une composante continue nulle, une largeur de spectre réduite et permettent une auto-correction.

#### 4.3. Conclusion sur les codes bipolaires

On notera que l'introduction d'une corrélation entre les symboles  $\{\alpha_k\}$  permet de détecter en réception la présence de certaines configurations d'erreurs de transmission ; pour un code à somme bornée, on utilisera le dépassement de la somme courante comme critère de détection d'erreurs.

#### 5. Conclusion sur les codes en ligne

*Remarque sur la bande occupée par un code en ligne :*

L'enveloppe de la DSP des codes présentés tend asymptotiquement vers 0 quand  $f \rightarrow \infty$  ; **la bande occupée est donc théoriquement infinie** car les signaux sont de durée finie.

Contrairement aux transmissions analogiques, la bande nécessaire à la transmission d'un signal numérique ne peut se déduire de la bande occupée par le signal utilisé ; **la bande nécessaire dépend de la rapidité de modulation du signal transmis et non de sa forme** : un code NRZ et un code RZ de même rapidité de modulation nécessiteront la même largeur de bande.

## **BIBLIOGRAPHIE**

---

Michel STEIN, "Les modems pour transmission de données", Collection technique et scientifique des télécommunications, Masson, édition de 1991

Alain GLAVIEUX, Michel JOINDOT, "Communications numériques-Introduction", Collection pédagogique de télécommunication, Masson, 1996

J.C. BIC, D. DUPONTEIL, J.C. IMBEAUX, "Eléments de communications numériques" tomes 1 et 2, Collection technique et scientifique des télécommunications, Dunod, 1996

Claude SEVIN, "Télécoms1, De la transmission à l'architecture de réseaux", Interéditions, 1998

Gérard BLANCHET, Maurice CHARBIT, "Traitement numérique du signal, simulations sous Matlab", Hermès, 1998