

Généralités sur la transmission d'information

10 novembre 2022

1 Caractéristiques d'un réseau de transmission

Les systèmes informatiques utilisent une logique binaire pour la représentation et la communication des données.

Définition 1. On appelle **débit binaire** noté D le nombre de chiffres binaires (bits) transmis par rapport à une unité de temps.

$$D = \frac{V}{t} \quad (1)$$

L'unité officielle du débit binaire est le bit/s.

Il existe deux grandes catégories d'informations :

- Les données **discrètes** : elles sont constituées d'une suite d'éléments indépendants et dénombrables. Par exemple, un nombre décimal est constitué d'un ou plusieurs chiffres (entre 0 et 9), et un texte d'une suite de lettres de l'alphabet.
- Les données **continues** ou **analogiques** : elles résultent de la variation continue d'un phénomène physique, comme la température, la tension, la fréquence. Dans ce cas, un capteur fournit un signal électrique **proportionnel** à l'amplitude du phénomène. On parle alors de **signal analogique**, ce dernier peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle borné.

Les signaux transmis dans un canal peuvent être **perturbés** par des phénomènes électriques ou électromagnétiques, qu'on appelle **bruit**. Le bruit peut provoquer des **erreurs** dans la transmission.

Définition 2. L'affaiblissement d'un signal, noté A et exprimé en décibel (dB), est défini par la relation suivante :

$$A = 10 \log_{10} (R) \quad (2)$$

où R est le rapport de la puissance d'entrée S par la puissance de sortie N . On peut alors réécrire la relation **signal sur bruit**, ou S/N :

$$A = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \quad (3)$$

Définition 3. Le *temps de transfert, ou latence* est le temps écoulé entre l'émission d'un bit et sa réception. Il dépend donc du moyen de propagation du signal, mais également du *temps de traitement* d'éventuels systèmes intermédiaires.

Le temps de transfert est rarement stable, car la charge du réseau peut varier d'un instant à un autre.

Définition 4. La *gigue (jitter)* désigne la variation du temps de transfert.

2 Codage des informations

Les différents états d'un système peuvent s'encoder selon deux approches.

2.1 Codes de longueur fixe

On peut considérer que chaque état du système est équiprobable. On définit alors un **code à longueur fixe**.

Définition 5. On représente les éléments d'un code de longueur fixe par un certain nombre de bits, la *longueur de code*, ou *code à n moments*.

Définition 6. Le nombre d'états P représentables par n bits est la *puissance lexicographique*.

$$P = 2^n \quad (4)$$

Réciproquement, si on souhaite représenter P états différents, il nous faut chercher le plus petit nombre de bits n suffisants.

Initialement, on peut encadrer P par deux puissances de 2 ainsi :

$$2^{n-1} < P \leq 2^n$$

Il faut donc $\log_2 P$ bits pour coder P états différents. On arrondit à l'excès pour avoir une valeur entière.

Définition 7. Le nombre de bits représente la *quantité d'information* Q apportée par la connaissance d'un état du système ayant une probabilité p d'apparaître.

$$Q = \log_2 \left(\frac{1}{p} \right) \quad (5)$$

2.2 Codes de longueur variable

Lorsque les états ne sont pas équiprobables, la quantité d'information qu'apporte un état est d'autant plus grande que la probabilité d'apparition est faible.

Définition 8. La *quantité moyenne d'information* apportée par la connaissance d'un état est l'*entropie*, notée H .

$$H = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 \frac{1}{p_i} \quad (6)$$

où p_i est la probabilité d'apparition du symbole de rang i .

L'entropie représente la longueur optimale du codage des symboles du système. Cette longueur est en général inatteignable.

Application : calculer l'entropie du système suivant :

Etat	Probabilité
E	0,48
A	0,21
S	0,12
T	0,08
U	0,06
Y	0,05

2.3 Code de Huffman

Huffman a proposé en 1952 un algorithme qui encode les caractères en prenant en compte la fréquence d'apparition, et dont la longueur moyenne se rapproche de la limite théorique. Il repose sur les 7 étapes suivantes :

1. lecture complète du fichier et création de la table des symboles¹.
2. classement des symboles (occurrences) par ordre décroissant de fréquences ;
3. réduction successive en rassemblant en une nouvelle occurrence les deux occurrences de plus petite fréquence ;
4. l'occurrence obtenue est insérée dans la table puis insérée dans l'ordre décroissant ;
5. on répète ces réductions jusqu'à ne plus avoir d'élément ;
6. on construit l'arbre binaire en reliant chaque occurrence à la racine ;
7. on encode les lettres : on lit l'arbre du sommet vers les feuilles en attribuant 0 à la valeur basse et 1 à la valeur haute.

2.4 Numérisation

1. Note : dans le cas où on dispose de la table de probabilités, alors on ramène ces valeurs à des entiers en les multipliant par une puissance de 10.

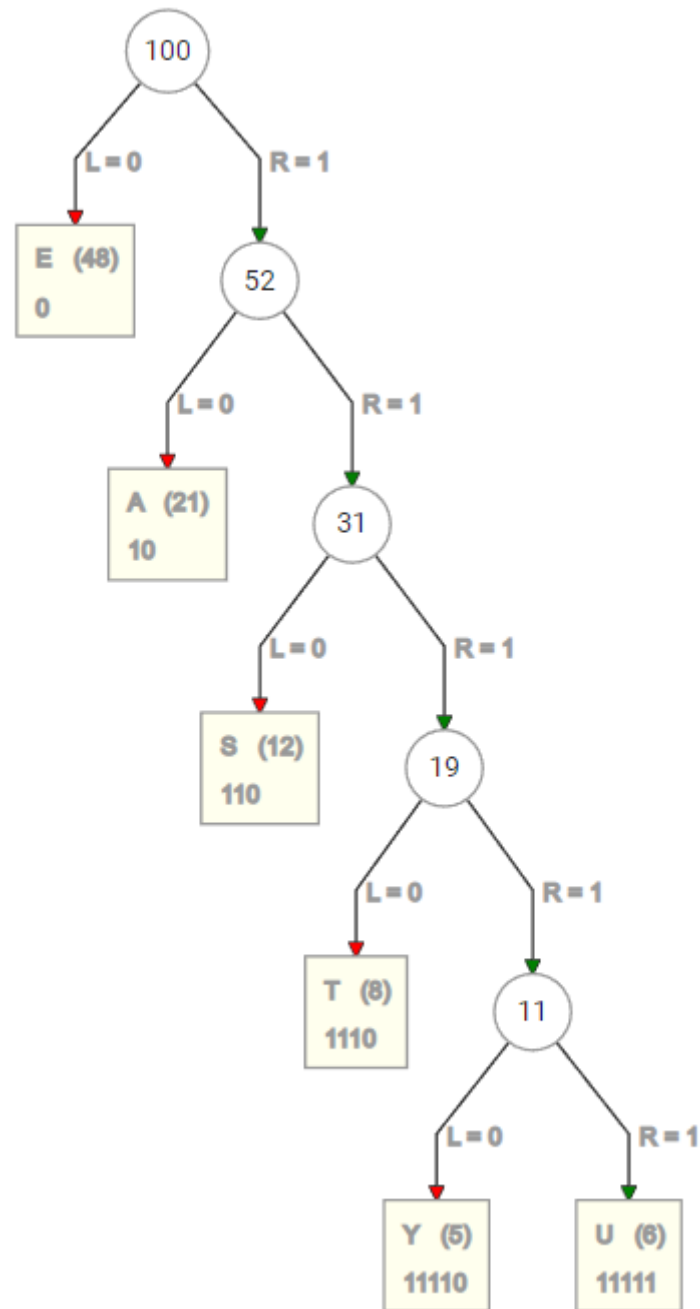


FIGURE 1 – Arbre de Huffman du tableau précédent

Définition 9. La *numérisation* est l'action de transformer une information en une suite *finie* et *discrète* de symboles.

Pour la réaliser, on prélève un échantillon du signal à des instants significatifs, et on exprime son amplitude par rapport à une échelle finie de valeurs. C'est l'étape de **quantification**. Le récepteur s'occupe de reconstituer le signal d'origine à partir des valeurs transmises. Il faut alors définir un **intervalle d'échantillonnage** (ou une fréquence d'échantillonnage), une amplitude, et un code pour chaque valeur possible.

Un tel procédé apporte nécessairement une perte d'information : le **bruit de quan-**

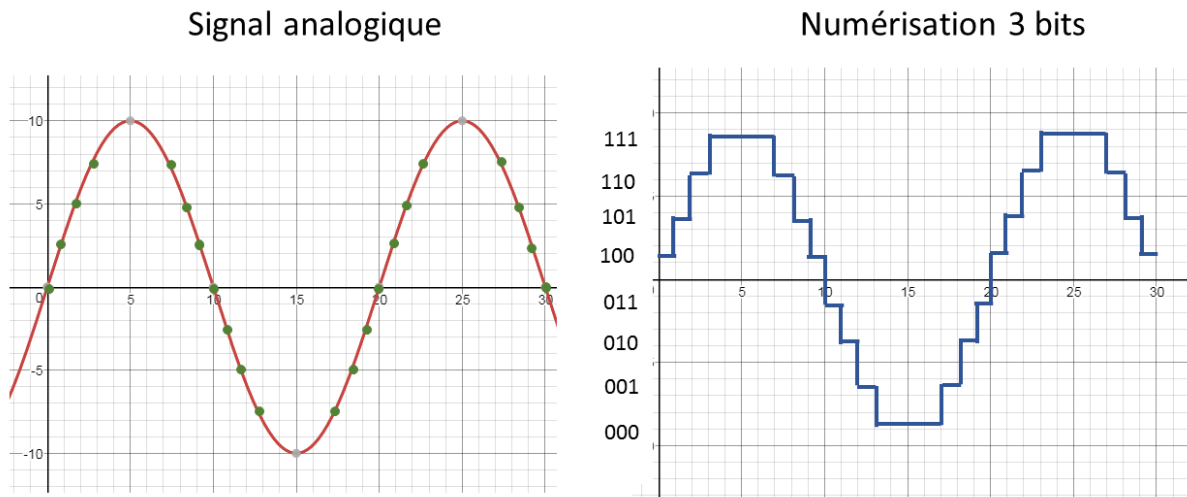


FIGURE 2 – Le signal analogique a été converti en signal numérique, dit en *escalier*

tification. Pour le minimiser, il faut envoyer un nombre minimum d'échantillons sur une unité de temps.

Théorème 1. *Le critère de Shannon stipule que la fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale du signal analogique.*

$$F_e \geq 2F_{max} \quad (7)$$

Exemple d'application

Un canal téléphonique utilise une plage de fréquences allant de 300 Hz à 3400 Hz. Si on arrondit à 4000 Hz la fréquence maximale, alors la fréquence d'échantillonnage sera de 8000 Hz, c-à-d 8000 échantillons prélevés par seconde. La représentation numérique de la voix devrait donc être à 4096 valeurs, soit 12 bits, mais une norme de compression ramène ce nombre à 8. Par seconde, il faudra donc transmettre 64 kb de données.

3 Transmission de données

3.1 Organisation des échanges

On distingue trois formes d'échanges d'informations entre deux correspondants :

1. La liaison **simplex**, où chaque machine ne peut remplir qu'une seule des deux fonctions d'émetteur et de récepteur. La communication n'a alors lieu que dans un sens ;
2. La liaison **half-duplex** où chaque machine peut alterner entre émission et réception, en moyennant un **temps de retournement** (qui peut atteindre 1/3s) ;
3. La liaison **full-duplex**, où chaque machine peut émettre et recevoir simultanément.

3.2 Modes de liaison

1. Liaison point à point : chaque machine est reliée à une seule autre machine.

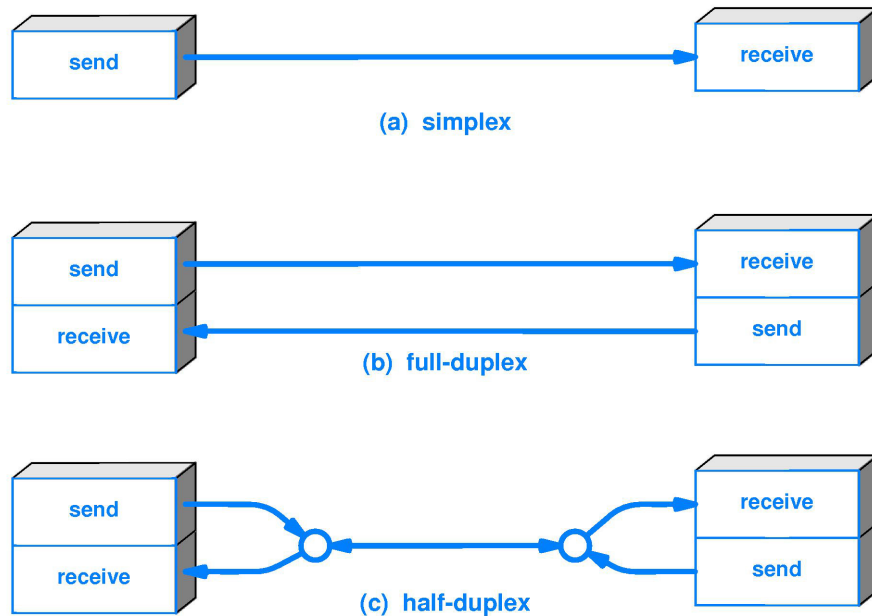


FIGURE 3 – Illustration des formes d'échanges

2. Liaison multi-points : un même support est partagé par plusieurs noeuds, et les conflits seront inévitables. Il faut donc réguler l'accès, et deux modes sont possibles :
 - mode maître-esclave : un ordinateur a pour mission d'initier le dialogue, récupérer les erreurs et organiser les échanges. Le terminal maître invite un terminal esclave à émettre (*polling*) ou de passer en mode sélection (*selecting*).
 - mode égal à égal : aucune restriction pour les machines, qui peuvent émettre à n'importe qui, n'importe quand. Les machines sont donc responsables des éventuelles erreurs de collisions qu'elles devront corriger. C'est un mode utilisé par les réseaux locaux.

3.3 Transmission selon des paramètres physiques

Définition 10. *L'information élémentaire est le **mot**, qui comporte en général 2^n bits.*

Les calculateurs transmettent en interne les données via un **bus** : un fil par bit. Ainsi, tous les bits du mots sont transmis simultanément : c'est une transmission **parallèle**. Comme elle est à l'origine de nombreux problèmes techniques, comme le rayonnement des conducteurs (*diaphonie*) et la différence des vitesses de propagation entre les conducteurs (*delay skew*). On réserve donc ce type de transmission physique à l'intérieur d'une machine, de processeur à processeur, ou d'hôte à hôte (ordinateur central).

Les transmissions à distance se feront généralement bit par bit, c'est à dire une transmission **série**. Comme les liaisons en interne se sont en parallèle, il faut une interface de conversion parallèle/série (sérialisation) pour l'émetteur, et une interface de conversion série/parallèle pour le récepteur (désérialisation). Une transmission série est moins coûteuse à mettre en oeuvre.

Les bits sont émis à une certaine cadence, définie par une **horloge** émission. Pour pouvoir décoder correctement le signal, il faut que le récepteur l'examine avec la même cadence que l'émetteur.

Définition 11. La ***synchronisation*** est une opération qui consiste à asservir l'horloge du récepteur sur celle de l'émetteur.

La désynchronisation est la source principale d'erreurs de transmission. Les horloges peuvent **dériver** et changer de fréquence d'émission, ce qui peut par exemple faire sauter la lecture d'un bit.

Il est également possible de réaliser une transmission indépendamment de l'horloge, on parle alors de transmission **asynchrone**. La synchronisation se réalise à partir d'un signal d'asservissement, puis l'horloge redevient libre. La dérive de l'horloge ne permet qu'un transfert très limité de données, néanmoins suffisant pour transmettre un caractère.

3.4 Comparaison des modes de transmission

Définition 12. Une liaison de données est caractérisée par son débit D , qui représente le nombre de bits transmis par unité de temps. On distingue le **débit nominal** D_n , qui correspond au débit théorique de transfert de la machine, et le **débit réel** qui mesure le débit des **bits utiles** lors de la transmission. Enfin, on appelle **efficacité** E le rapport entre ces deux valeurs.

$$E = \frac{D_r}{D_n} \quad (8)$$

Exemple

Une trame PPP contient 8 octets de service et une charge utile (*payload*) de 1500 octets. En mode synchrone, l'efficacité correspond à la définition donnée ci-dessus :

$$E = \frac{1500}{1508} = 0,994$$

En mode asynchrone, il faut compter pour chaque octet transféré un bit de start et un bit de stop.

$$E = \frac{1500}{1508} \times \frac{8}{10} = 0,795$$

4 Supports de transmission

Définition 13. On appelle bande passante d'un support de transmission la **plage des fréquences** qui peuvent être utilisées sur un câble ou par toute autre voie de communication dans laquelle l'**affaiblissement** du signal est inférieur à une valeur donnée.

Par exemple, la parole utilise les fréquences de 300 à 3 400 Hz, sa bande passante est donc de 3 100 Hz. Les autres fréquences présentent trop d'affaiblissement et peuvent être ignorées.

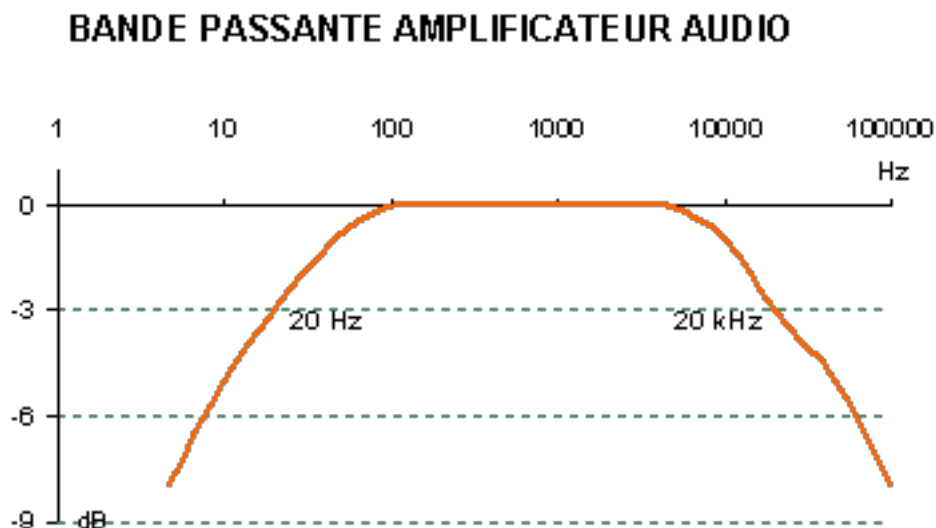


FIGURE 4 – Diagramme d'affaiblissement de la voix

La paire torsadée (voir fig.5) est constituée de deux conducteurs identiques. Les torsades permettent de réduire l'inductance (le champ magnétique) de la ligne. Plusieurs paires sont enveloppées dans une gaine et forment un câble.

Le câble coaxial (voir fig.6) est constitué de deux conducteurs concentriques maintenus à distance constante par un diélectrique. Il autorise des débits plus élevés que la paire torsadée et est peu sensible aux perturbations électromagnétiques extérieures. On estime à 10^{-9} le taux d'erreur sur un tel câble.

Un câble à fibre optique (voir fig.7) fait réfléchir un faisceau de lumière contenant l'information à l'intérieur. Un tel système met en oeuvre un émetteur de lumière : une diode LED ou une diode LASER, ainsi qu'un récepteur de lumière : une photodiode de type PIN ou PDA qui traduit les impulsions lumineuses en signaux électriques.

Une liaison hertzienne (voir fig.8) peut s'effectuer à partir d'une antenne d'émission,

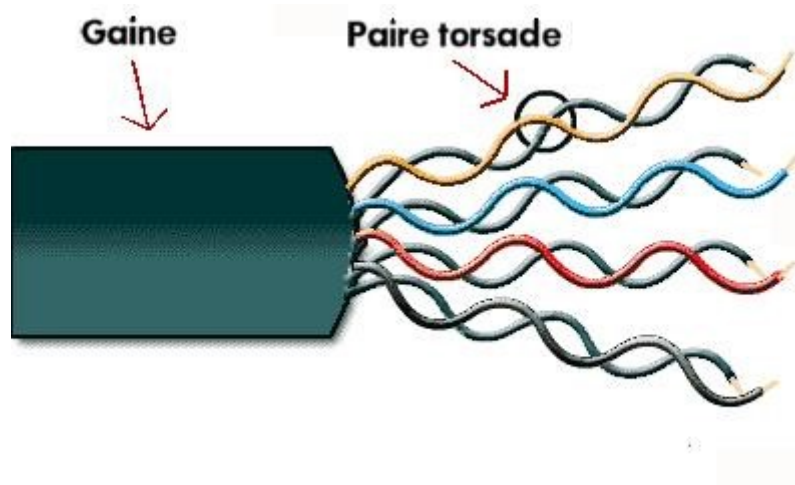


FIGURE 5 – Schéma d'un câble formé par des paires torsadées

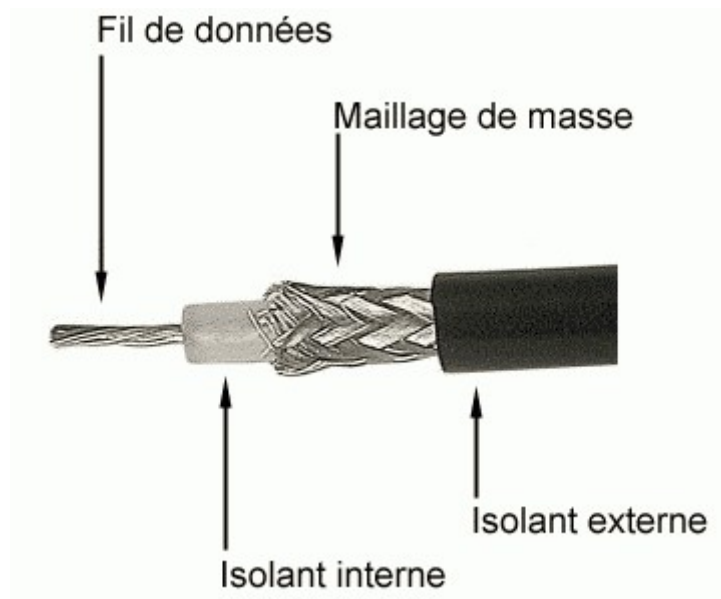


FIGURE 6 – Schéma d'un câble coaxial

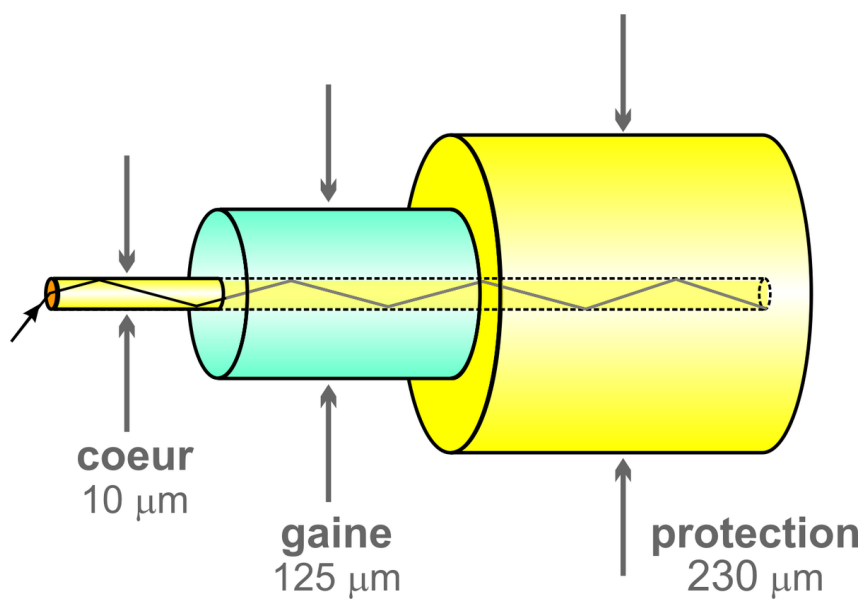


FIGURE 7 – Schéma d'un câble à fibre optique

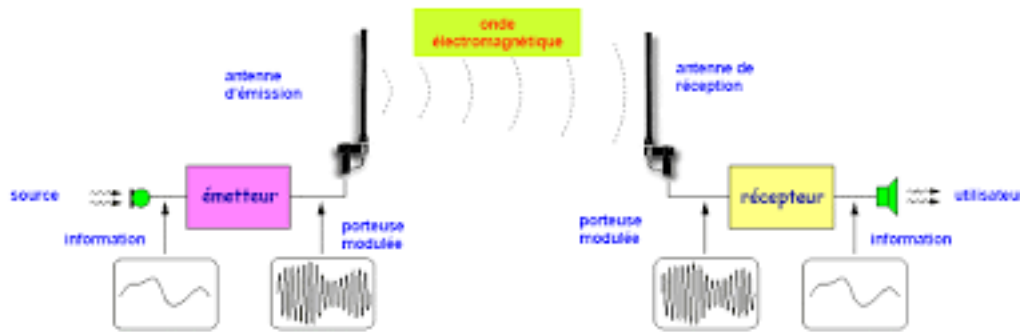


FIGURE 8 – Schéma d'une liaison radioélectrique

qui rayonne une énergie sous forme d'onde électromagnétique, qui sera captée par une antenne de réception qui la transformera en courant électrique similaire à celui envoyé. Elles sont exploitées lorsqu'il est nécessaire :

- de diffuser une même information vers plusieurs utilisateurs ;
- de mettre en relation des stations mobiles ;
- de relier des entités éloignées.

5 Transmission en bande de base

Définition 14. *Un système de transmission en bande de base n'introduisent pas d'écart de fréquence entre les signaux émis et les signaux reçus.*

Un signal numérique en bande de base est caractérisé par :

- une suite de bits représentant les données numériques ;
- un changement d'états discret correspondant à l'amplitude ;
- une durée constante pour chaque bit.

Définition 15. *Le **baud** (**Bd**) est l'unité de rapidité de modulation en transmission numérique. Il correspond à l'inverse de la durée en secondes du plus court élément du signal, ou alors le nombre d'éléments du signal transmis en une seconde.*

Ce type de transmission est simple à mettre en oeuvre mais elle comporte des limites causées par la bande passante du canal ainsi que le rapport signal sur bruit.

Définition 16. Critère de Nyquist

*Si on note R_{max} le nombre maximum de transitions qu'un système peut supporter (**rapidité de modulation**) et BP la bande passante du signal, alors :*

$$R_{max} \leq 2BP \quad (9)$$

On peut réaliser une transmission comportant plus de deux états.

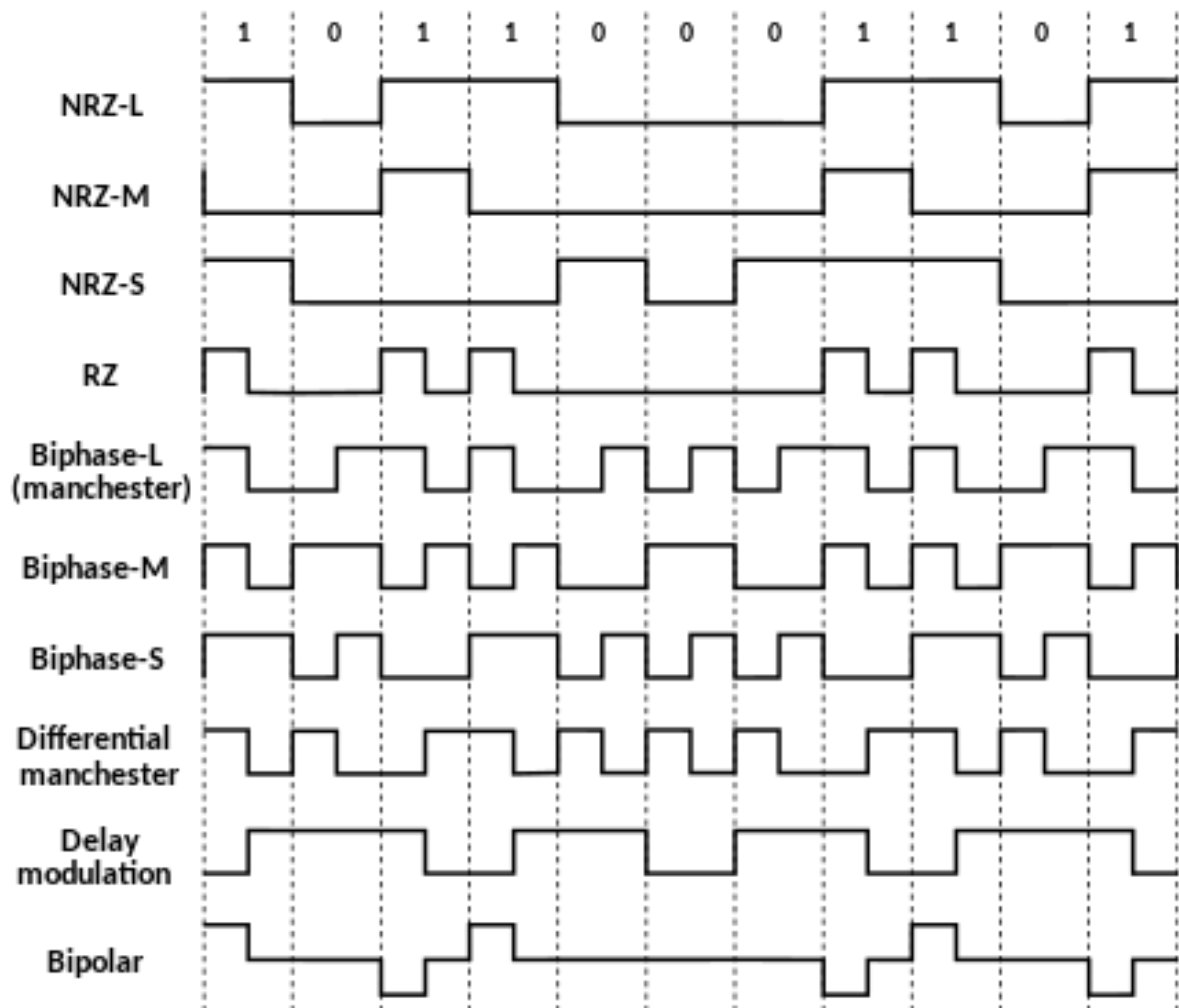


FIGURE 9 – Exemples d'encodage d'un signal binaire

Codage en ligne	Codage du 0	Codage du 1	Remarques
NRZ	Etat bas	Etat haut	Compréhension facile mais pas de transition lors d'une longue séquence de 0
NRZI	Etat identique à l'état précédent	Changement d'état	Compréhension facile mais pas de transition lors d'une longue séquence de 0
Manchester	Transition de l'état bas vers l'état haut	Transition de l'état haut vers l'état bas	Codage synchrone, donc l'instant est également transmis. Résiste au bruit.
Manchester différentiel	Répétition de l'état précédent	Inversion de l'état précédent	Codage synchrone, donc l'instant est également transmis. Résiste au bruit.

Définition 17. La *valence* d'un signal, notée V , correspond au nombre d'états différents qu'il peut prendre. On la choisit généralement de sorte à ce qu'elle soit une puissance de 2 pour pouvoir l'encoder en binaire.

Définition 18. La valence, le débit de transmission en bit/s et la rapidité de modulation sont liés par la formule suivante :

$$D = \log_2(V) \times R \quad (10)$$

Ces formules restent théoriques. Dans la réalité, des phénomènes électriques et électromagnétiques perturbent la transmission : le **bruit blanc**, issu de l'agitation des électrons, et le **bruit impulsionnel** issu de l'environnement physique du canal.

Définition 19. Le nombre maximal V_{max} d'états discernables (valence) est donné par la relation suivante :

$$V_{max} = \sqrt{1 + \frac{S}{N}} \quad (11)$$

Définition 20. La *capacité de transmission maximale* d'un canal, notée C , connaissant la bande passante, notée BP , est donnée par la formule de Shannon :

$$C = BP \log_2 \left(1 + \frac{S}{B} \right) \quad (12)$$

6 Exercices

Exercice 1 — Affaiblissement du signal

1. Donner l'affaiblissement en décibel lorsque le signal, à la sortie de la voie de communication, n'est plus que de 50%, 10% et 1% de sa puissance initiale.
2. Le seuil de perte valable est donné à 3 dB. Quelle est la bande passante H d'un câble qui accepte des fréquences de 4 000 Hz à 24 000 Hz avec un affaiblissement inférieur à 3 dB ?
3. Avec un câble de 20 000 Hz de bande passante, il est à priori possible de faire passer 20 000 bits en transportant 1 bit par signal. Les lignes de communication sont cependant perturbées par ce que l'on appelle du **bruit**. Le rapport R d'affaiblissement qui en résulte s'exprime sous la forme $R = \frac{S}{B}$, où S correspond à l'énergie du signal et B à l'énergie du bruit. On appelle ce rapport *signal sur bruit*. En supposant que le rapport signal sur bruit du câble précédent soit de 30 dB, quelle est la capacité de transmission maximale ?
4. Pour augmenter simplement le débit d'une voie de communication, il faut transporter plus d'un élément binaire par signal de base.
Par exemple, un signal de valence 4 pourrait fonctionner ainsi :
 - une différence de potentiel de $+4V$, donne le nombre 00 ;
 - une différence de potentiel de $+2V$, donne le nombre 01 ;
 - une différence de potentiel de $-2V$, donne le nombre 10 ;
 - une différence de potentiel de $-4V$, donne le nombre 1 ;

Combien de combinaisons différentes sont-elles nécessaires pour atteindre la capacité maximale obtenue à la question précédente ?

On comprend donc qu'avec une valence sous la forme 2^n , on a $D = nR$.

Exercice 2 — Ligne téléphonique

On considère une liaison téléphonique dont la bande passante est 300 Hz - 3400 Hz, une rapidité de modulation de 1200 bauds et des signaux de valence 16 .

1. Quel est le débit binaire de la ligne ?
2. On suppose que la ligne présente un rapport S/B de 34 dB. Quelle est la capacité théorique de cette ligne ?
3. Rappeler les trois étapes de la numérisation.
4. Calculer la valeur du débit de la numérisation de la parole sachant que l'échantillonnage a lieu tous les 125 micro-secondes et que le codage se fait sur 8 bits.

Exercice 3 — Erreurs

On pose p la probabilité qu'un bit soit inversé dans une transmission. Calculer la probabilité de trouver une erreur sur une trame de 1000 bits pour $p = 10^{-3}$, $p = 10^{-4}$, $p = 10^{-5}$.

Exercice 4 — Exercice classique

Quel est le débit maximum praticable lorsque l'on transmet une série d'informations binaires dans un canal offrant 3 kHz de bande passante et dont le rapport signal sur bruit est de 20 dB ?

Exercice 5 — Etude des codes en ligne

Coder la séquence de bits 1010 1100 0011 en utilisant :

- le codage NRZ ;
- le codage NRZI (en supposant que le niveau précédent était $+v$) ;
- le codage Manchester ;
- le codage Manchester différentiel (en supposant que l'impulsion précédente était un front montant) ;

Exercice 6 — Codes de détection d'erreur - Bit de parité

1. Calculer le bit de parité des messages suivants :
 - 1001101 ;
 - 1010111 ;
 - 0110001 ;
 - 0110110 ;
2. Parmi tous les mots reçus avec le bit de parité à la fin, pour lesquels peut-on affirmer avec certitude qu'ils sont erronés ?
 - 11011011 ;
 - 10110000 ;
 - 11111101 ;
 - 10010110 ;

Code de redondance cyclique

Le code de redondance cyclique consiste à représenter un mot binaire par un polynôme. Par exemple, le mot binaire [10110] sera représenté par le polynôme $P = X^4 + X^2 + X^1$.

Définition 21. *Un CRC est caractérisé par un **polynôme générateur** P_g de degré r . On ajoute alors r bits au mot à transmettre.*

Pour déterminer le CRC, on effectue la division euclidienne du polynôme correspondant au mot, multiplié par un monôme de degré égal au degré du polynôme générateur, par le polynôme générateur. Cela revient à effectuer une ou plusieurs opérations XOR (ou exclusif) en suivant l'algorithme ci-dessous.

Algorithme 1 : Division de polynômes**Données :** Trois entiers positifs m , g , r sous forme binaire**Résultat :** Le *Frame Control Sequence* à ajouter à la fin du mot.

- 1 Décaler m de $\deg(g)$ rangs vers la gauche
- 2 **tant que** $\deg(m) > \deg(g)$ **faire**
- 3 Décaler les bits de g pour que sa puissance du bit de poids fort soit égale à celle du bit de poids fort de m .
- 4 $m \leftarrow m \text{ XOR } g$
- 5 **fin**
- 6 Écrire(m)

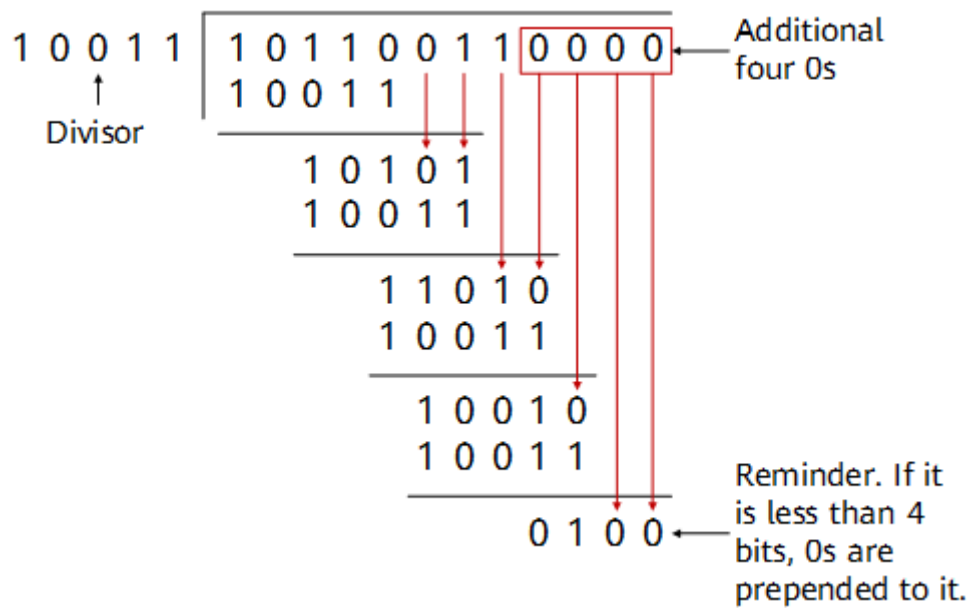


FIGURE 10 – Un exemple d'application de cet algorithme avec le polynôme $X^4 + X + 1$ pour le mot binaire 10110011.

Et lors de la réception du mot, on effectue la division du mot reçu par le même polynôme. Si le reste obtenu est 0, alors le mot a été correctement transmis, sinon, il y a des erreurs.

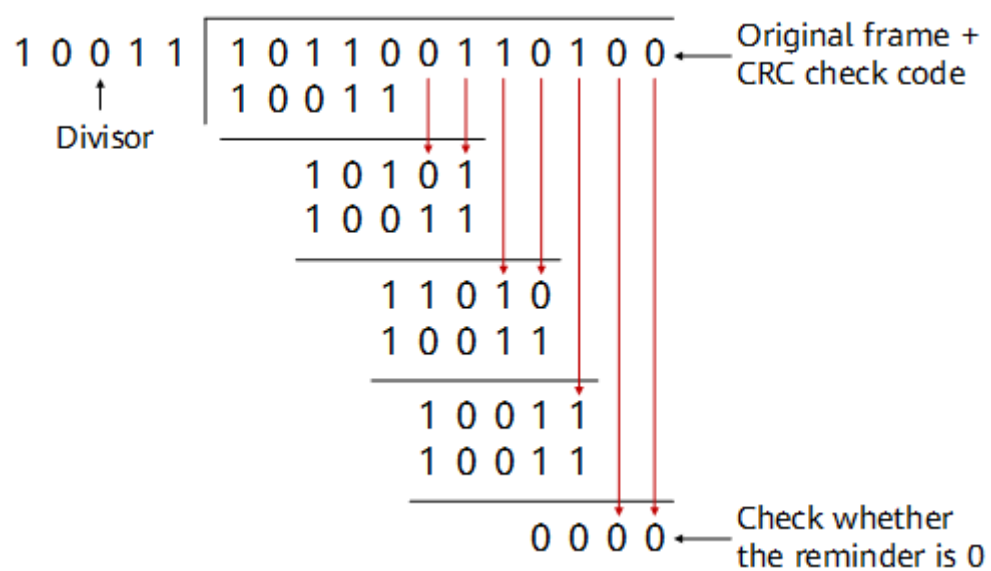


FIGURE 11 – Vérification de la transmission du mot.