

Transmission de données

Chapitre 1 : Représentation de L'information

1) Les différents types d'information

Les informations transmises peuvent être réparties en deux grandes catégories selon ce qu'elles représentent et les transformations qu'elles subissent pour être traitées dans les systèmes informatiques. On distingue :

- Les données discrètes, l'information correspond à l'assemblage d'une suite d'éléments indépendants les uns des autres (suite discontinue de valeurs) et dénombrables (ensemble fini).

Par exemple, un texte est une association de mots eux-mêmes composés de lettres (symboles élémentaires).

- Les données continues ou analogiques résultent de la variation continue d'un phénomène physique : température, voix, image... Un capteur fournit une tension électrique proportionnelle à l'amplitude du phénomène physique analysé : signal analogique (signal qui varie de manière analogue au phénomène physique). Un signal analogique peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle déterminé (bornes).

Pour traiter ces informations par des équipements informatiques il est nécessaire de substituer à chaque élément d'information une valeur binaire représentative de l'amplitude de celui-ci. Cette opération porte le nom de codage de l'information (codage à la source) pour les informations discrètes et numérisation de l'information pour les informations analogiques.

2) Codage des informations

a) Définition

Coder l'information consiste à faire correspondre (bijection) à chaque symbole d'un alphabet (élément à coder) une représentation binaire (mot code).

L'ensemble des mots codes constitue le code. Ces informations peuvent aussi bien être un ensemble de commandes d'une machine-outil que des caractères alphanumériques... C'est à ces derniers codes que nous allons nous intéresser.

b) Les différents types de code

Le codage des différents états d'un système peut s'envisager selon deux approches. La première, la plus simple, considère que chacun des états du système est équiprobable. La seconde prend en compte la fréquence d'apparition d'un état. Cette approche conduit à définir deux types de code : les codes de longueur fixe et les codes de longueur variable.

➤ Les codes de longueur fixe

Chaque état du système est codé par un certain nombre de bits, appelé longueur du code, longueur du mot code ou encore code à n moments.

Avec 1 bit on peut coder 2 états (0,1)

- Avec 2 bits on peut coder 4 états (00, 01, 10, 11)
- Avec 3 bits on peut coder 8 états (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111)

D'une manière générale :

- Avec n bits on code 2^n états

Le nombre d'états pouvant être codés par un code de n bits s'appelle puissance lexicographique du code que l'on note :

$$P = 2^n$$

Le nombre de bits pour coder P symboles est donc

$$n = \log_2(P)$$

Ce nombre de bits (n) représente la quantité d'information (Q) apportée par la connaissance d'un état du système. Lorsque dans un système, tous les états sont équiprobables, la quantité d'information apportée par la connaissance d'un état est la même quel que soit l'état connu.

Si l'information est représentée par deux valeurs équiprobables (0 ou 1, pile ou face...), la quantité d'information, exprimée en shannon⁵ ou plus simplement en bit, est :

$$Q = \log_2(2) = 1 \text{ Shannon ou 1 bit.}$$

Le bit est la quantité d'information qui correspond au lever de doute entre deux symboles équiprobables.

Lorsque tous les états ne sont pas équiprobables, la quantité d'information est d'autant plus grande que la probabilité de réalisation de l'état est faible. Si p est la probabilité de réalisation de l'état P , la quantité d'information apportée par la connaissance de P est :

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

Application : combien de bits sont nécessaires pour coder toutes les lettres de l'alphabet et quelle est la quantité d'information transmise par une lettre (en supposant équiprobable l'apparition de chaque lettre) ?

➤ Les codes de longueur variable

Lorsque les états du système ne sont pas équiprobables, la quantité d'information apportée par la connaissance d'un état est d'autant plus grande que cet état a une faible probabilité de se réaliser. La quantité moyenne d'information apportée par la connaissance d'un état, appelée **entropie**, est donnée par la relation :

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} p_i \log_2 \frac{1}{p_i}$$

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

L'entropie représente la longueur optimale du codage des symboles du système. Déterminons la longueur optimale du code (entropie) pour le système décrit par le tableau ci-dessous.

À des fins de simplicité, chaque état est identifié par une lettre.

État	Probabilité
E	0,48
A	0,21
S	0.12
T	0.08
U	0.06
Y	0.05

La longueur optimale du mot code $H=1,92$:

Le code optimal utile est de 1,92 bit, alors que l'utilisation d'un code à longueur fixe nécessite 3 bits pour coder les 6 états de ce système ($2^2 < 6 < 2^3$).

Il n'existe pas de code qui permette d'atteindre cette limite théorique. Cependant, Huffman introduit en 1952 une méthode de codage qui prend en compte la fréquence d'occurrence des états et qui se rapproche de cette limite théorique.

Construction du code de Huffman (figure 2.6) :

1. lecture complète du fichier et création de la table des symboles ;
2. classement des symboles par ordre des fréquences décroissantes (occurrence);
3. réductions successives en rassemblant en une nouvelle occurrence les deux occurrences de plus petite fréquence ;
4. l'occurrence obtenue est insérée dans la table et celle-ci est à nouveau triée par ordre décroissant;
5. les réductions se poursuivent jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'élément ;
6. construire l'arbre binaire en reliant chaque occurrence à la racine ;
7. le codage consiste à lire l'arbre du sommet aux feuilles en attribuant par exemple la valeur 0 aux branches basses et 1 aux branches hautes.

Le codage de Huffman permet de réduire le nombre de bits utilisés pour coder l'information. Dépendant du contexte, il impose, avant la transmission, d'établir une convention (Huffman modifié utilisé en télécopie groupe 3) ou de transmettre, avant les données, le contenu de la table construite par l'émetteur.

3) Numérisation des informations

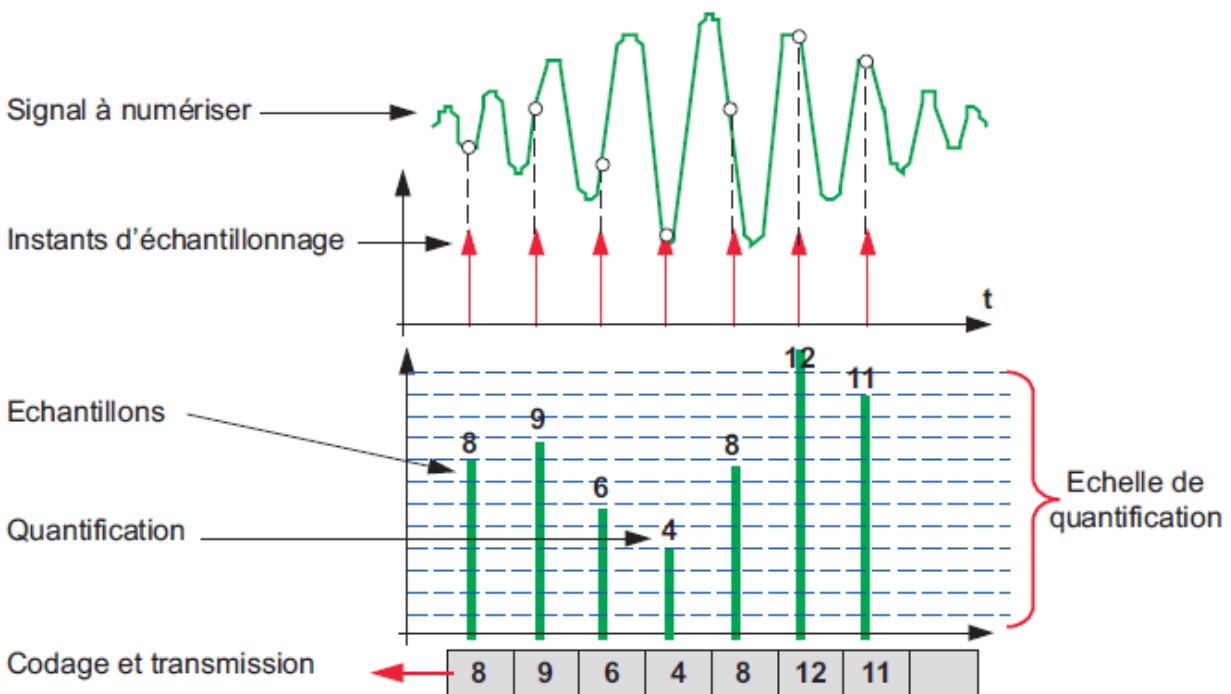
Principe

Numériser une grandeur analogique consiste à transformer la suite continue de valeurs en une suite discrète et finie. À cet effet, on prélève, à des instants significatifs, un échantillon du signal et on exprime son amplitude par rapport à une échelle finie (quantification).

Le récepteur, à partir des valeurs transmises, reconstitue le signal d'origine. Une restitution fidèle du signal nécessite que soient définis :

- l'intervalle d'échantillonnage qui doit être une constante du système (fréquence d'échantillonnage);
- l'amplitude de l'échelle de quantification, celle-ci doit être suffisante pour reproduire la dynamique du signal (différence d'amplitude entre la valeur la plus faible et la valeur la plus forte) ;
- que chaque valeur obtenue soit codée.

La figure ci-dessous représente les différentes étapes de la numérisation du signal. À intervalle régulier (période d'échantillonnage), on prélève une fraction du signal (échantillon). Puis, on fait correspondre à l'amplitude de chaque échantillon une valeur (quantification), cette valeur est ensuite transformée en valeur binaire (codification).

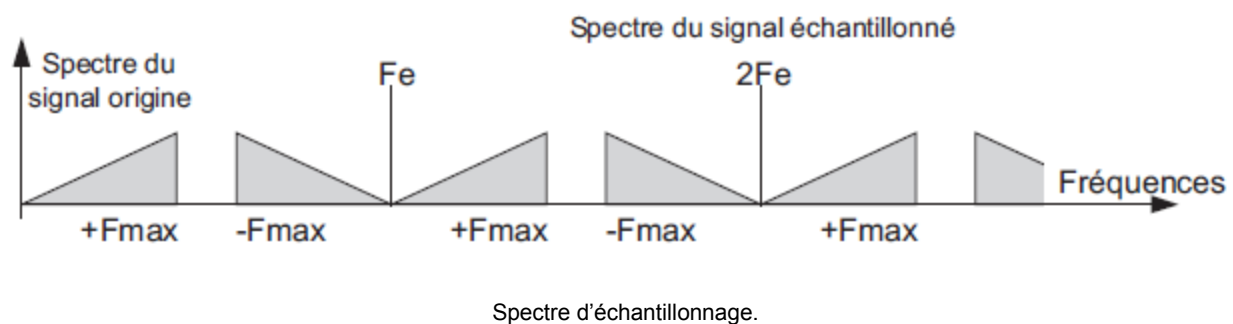


Numérisation d'un signal analogique.

La quantification définit des valeurs en escalier (par bond) alors que le phénomène à quantifier varie de façon continue. Aussi, quel que soit le nombre de niveaux utilisés, une approximation est nécessaire, celle-ci introduit une erreur dite de quantification ou bruit de quantification qui est la différence entre la valeur réelle de l'échantillon et la valeur quantifiée.

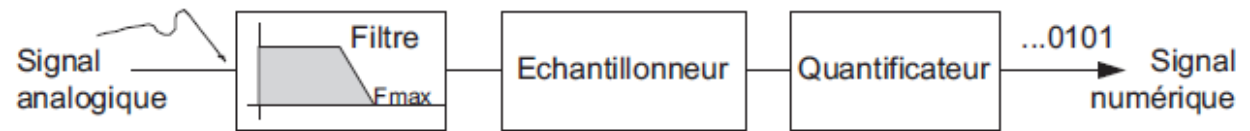
Pour reproduire correctement le signal à l'arrivée, le récepteur doit disposer d'un minimum d'échantillons. Il existe donc une relation étroite entre la fréquence maximale des variations du signal à discrétiser et le nombre d'échantillons à prélever.

Soit un signal dont le spectre est limité et dont la borne supérieure vaut F_{\max} , Shannon a montré que si F_e est la fréquence d'échantillonnage, le spectre du signal échantillonné est le double de F_{\max} et est centré autour de F_e , $2F_e$, \dots , nF_e . Par conséquent, pour éviter tout recouvrement de spectre, le signal à échantillonner doit être borné (filtre) à une fréquence supérieure telle que F_{\max} soit inférieure à la moitié de l'intervalle d'écartement des spectres (F_e). La figure ci-dessous illustre cette relation appelée **relation de Shannon**.



On en déduit que la fréquence minimale d'échantillonnage (fréquence de Nyquist) d'un signal doit être le double de la fréquence maximale du signal à échantillonner :

$$F_{\text{échantillon}} \geq 2 \cdot F_{\text{max du signal}}$$



Structure élémentaire d'un convertisseur analogique/numérique.

Chapitre 2 : Supports de transmission

Les données numérisées sont une succession de 1 et de 0. L'acheminement de ces données binaires se fait à l'aide d'un support physique de transmission. Ces supports sont :

- Des fils métalliques (paires torsadées) ;
- Des fils de cuivre pour le téléphone ;
- Des câbles coaxiaux (câbles TV) ;
- Des fibres optiques ;
- Des faisceaux hertziens : la transmission se fait de proche en proche et deux émetteurs-récepteurs qui se suivent doivent se voir.
- Des satellites ;
- Des supports sans fils...

1) Transmission sur supports filaires en cuivre

Les supports en cuivre employés sont la paire torsadée et le câble coaxial.

a) Supports bifilaires (symétriques)

La *paire torsadée* est le support de transmission le plus ancien et encore le plus largement utilisé, principalement pour les services téléphoniques. La paire torsadée est composée de deux conducteurs en cuivre, isolés l'un de l'autre, et enroulés de façon hélicoïdale autour de l'axe longitudinale. L'affaiblissement croît rapidement avec la longueur du support.

Le débit binaire accessible dépend de la qualité du câble et de sa longueur ; il peut varier entre quelques dizaines de Kbit/s sur quelques dizaine²s de km, quelques Mbit/s sur quelques km et plusieurs centaines de Mbit/s pour quelques centaines de mètres. La sensibilité aux parasites d'origine électromagnétique est relativement importante mais peut être réduite si le

câble est blindé. Enfin, le taux d'erreur est de l'ordre de 10^{-5} . Le rayonnement électromagnétique d'un câble non blindé permet l'écoute de la communication. L'importance de l'infrastructure en paire torsadée au niveau de la boucle locale des réseaux de télécommunication et du câblage des immeubles, ainsi que l'évolution des techniques de transmission sur des paires torsadées (ADSL, Gigabit Ethernet), font que son remplacement généralisé, par d'autres supports, ne soit pas envisagé à court terme.

b) Support coaxial

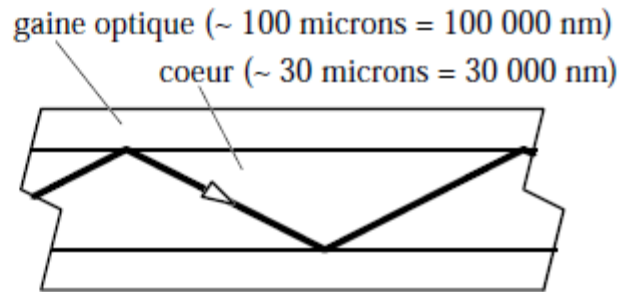
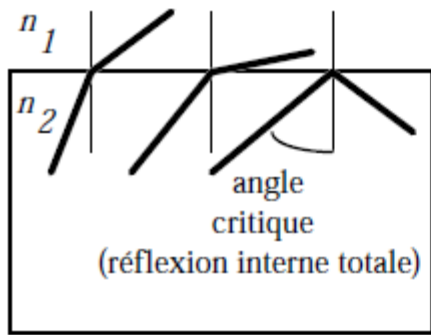
Plus cher que la paire torsadée, le câble coaxial est encore largement utilisé pour des artères à moyen débit des réseaux de transport, ainsi que pour les réseaux de télédiffusion. Deux types de câbles sont les plus utilisés, le câble à impédance caractéristique de 50 ohms (notamment pour les réseaux locaux) et le câble à impédance de 75 ohms (télédiffusion, artères internes aux réseaux téléphoniques interurbains et internationaux).

La bande passante peut atteindre 400 MHz sur plusieurs dizaines de km. Le débit binaire typiquement employé est de 10 Mbit/s (réseaux Ethernet) sur des distances inférieures à 1km et peut monter jusqu'à plusieurs centaines de Mbit/s sur des distances très courtes.

La sensibilité aux parasites ainsi que l'affaiblissement sont réduits par rapport à la paire torsadée (mais le prix est significativement plus élevé). Le taux d'erreur est de l'ordre de 10^{-7} . Le câble coaxial est progressivement remplacé par la fibre optique.

2) Transmission par fibre optique

Les signaux binaires sont transmis sous la forme d'impulsions lumineuses, à travers un guide d'onde en fibre de verre. Afin de maintenir les rayons lumineux à l'intérieur du fibre optique, le phénomène de réflexion totale est Employé.



L'indice de réfraction de la gaine (n_1) doit être inférieur à celui du cœur (n_2). L'angle critique est donné par la formule:

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_1}{n_2}$$

(dans l'équation de la réfraction $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, $\theta_2 = \theta_c$ quand $\theta_1 = 90^\circ$).

Afin de subir uniquement des réflexions totales dans la fibre, un rayon lumineux en provenance d'une source (diode électroluminescente pour des longueurs d'onde 800,900 nm, diode laser pour 800,1300 nm) doit atteindre le bout de la fibre sous un angle d'incidence inférieur à :

$$\theta_A = \arcsin \frac{\sqrt{n_2^2 - n_1^2}}{n_0}$$

n_0 étant l'indice de réfraction de l'air.

Tous les rayons qui dépassent l'angle critique subissent une réflexion totale ; ce sont donc en général plusieurs rayons, correspondant au même signal, qui se propagent à l'intérieur de la fibre optique ¼ fibre *multimode* à saut d'indice (dessins précédents) ou à gradient d'indice. Quand le diamètre du cœur de la fibre est tellement réduit (comparable à la longueur d'onde de la lumière utilisée) qu'un seul rayon peut se propager, la fibre est appelée *monomode*.

Les débits binaires varient entre plusieurs centaines de Mbit/s (fibre multimode, plusieurs km) et environ 10 Gbit/s (fibre monomode, jusqu'à 100 km). L'affaiblissement est très réduit, 0,2-0,8 dB/km, donc les transmissions sans répéteurs sur des distances de 100 à 200 km sont courantes. L'étude de l'affaiblissement dans une fibre de silice fait apparaître 3 minima : 1dB/km pour une longueur d'onde de 850 nm, 0,35 dB/km pour 1300 nm et 0,2 dB/km pour 1550 nm.

La fibre optique est insensible aux parasites d'origine électromagnétique et assure un taux d'erreur très bas, de l'ordre de 10^{-12} . Aussi, la fibre optique ne produit pas de rayonnement électromagnétique, ce qui contribue à la confidentialité des transmissions.

Grâce à ses avantages, la fibre optique non seulement remplace le câble coaxial sur les artères (*backbones*) des réseaux de télécommunication, mais s'impose aussi pour l'infrastructure des réseaux locaux à haut débit (Gigabit Ethernet) et est parfois employée pour la boucle locale (FTTO, *Fiber To The Office*). Le câble en fibre optique reste en revanche plus cher que le câble coaxial et son installation pose des difficultés supplémentaires. Après avoir été largement employées il y a quelques années, les fibres multimode sont en cours de remplacement aujourd'hui par des fibres monomode.

a) *Wavelength Division Multiplexing*

La capacité de transmission des fibres optiques peut être sensiblement augmentée en utilisant le multiplexage de longueurs d'onde, ou *Wavelength Division Multiplexing*, WDM. A l'émission on fait correspondre à chaque flot d'informations une longueur d'onde différente. Les rayons lumineux n'interagissent pas dans la fibre, et la longueur d'onde d'un des rayons n'évolue pas. En conséquence, à la réception on peut extraire chaque flot d'informations

par un simple démultiplexage optique. Un multiplexage de 8 longueurs d'onde (8 λ) est couramment employé, et des expérimentations sont en cours avec 160 longueurs d'onde différentes (DWDM, *Dense WDM*, ou HDWDM, *High Density WDM*). Cela permet donc d'atteindre des débits binaires allant de 20 Gbit/s à 400 Gbit/s par fibre. Voir aussi <http://www.techguide.com/comm/dwave.shtml>.

3) Les ondes en transmission à vue directe

a) Transmissions par rayons laser

Des faisceaux laser très directifs peuvent être employés comme support pour des transmissions de données entre immeubles proches. Les débits peuvent être très importants (comme pour la fibre optique) et l'absence de support à installer présente l'avantage d'un coût nettement moins élevé. En revanche, les conditions météorologiques peuvent affecter dans des cas extrêmes la qualité des communications.

b) Transmissions par faisceaux hertziens

Pour des distances plus importantes, mais toujours à vue directe (dizaines de km, en fonction de la hauteur des antennes), des faisceaux dirigés d'ondes radio peuvent être employés et présentent le même avantage de coût d'installation réduit. Les transmissions sont à transposition de fréquence, la plage de fréquences employée pour la porteuse étant de 2 à 40 GHz. Il faut noter que l'atténuation du signal émis augmente fortement avec la fréquence de la porteuse. Les émetteurs utilisés pour les télécommunications sont de faible puissance (1 W).

La dispersion des faisceaux étant relativement importante, des techniques de cryptage doivent être employées afin de maintenir la confidentialité des communications.

4) Transmissions par satellite

Les transmissions par satellite emploient les satellites *géostationnaires*, qui se trouvent sur une orbite à 36000 km d'altitude au-dessus de l'équateur. Les bandes de fréquences attribuées aux réseaux de communications par satellite sont 3,7-4,2 GHz, 5,925-6,425 GHz, 12-14 GHz et 20-30GHz. Dans les deux premières bandes, l'écart de position entre deux satellites doit être supérieur à 4° (ou 8° pour les satellites de télédiffusion, de puissance plus élevée) afin d'assurer une bonne sélectivité (éviter les interférences). Les satellites de télécommunication possèdent des émetteurs de faible puissance ($< 10\text{ W}$) par rapport aux satellites de télédiffusion ($> 500\text{ W}$). Dans la troisième bande, les écarts angulaires peuvent être de seulement 1° mais l'atténuation dans l'atmosphère des signaux est beaucoup plus forte (surtout dans les particules d'eau). De façon générale, les conditions atmosphériques au sol ou en altitude peuvent affecter temporairement la qualité des communications. La quatrième bande commence seulement à être utilisée.

Les débits accessibles aux utilisateurs peuvent aller jusqu'à plusieurs Mbit/s. Les délais de transmission sont relativement importants (250-300 millisecondes) et doivent être pris en compte dans la conception des protocoles de communication (notamment pour la correction des erreurs par retransmission).

La dispersion des faisceaux au sol étant importante, des techniques de cryptage sont indispensables pour maintenir la confidentialité des communications.

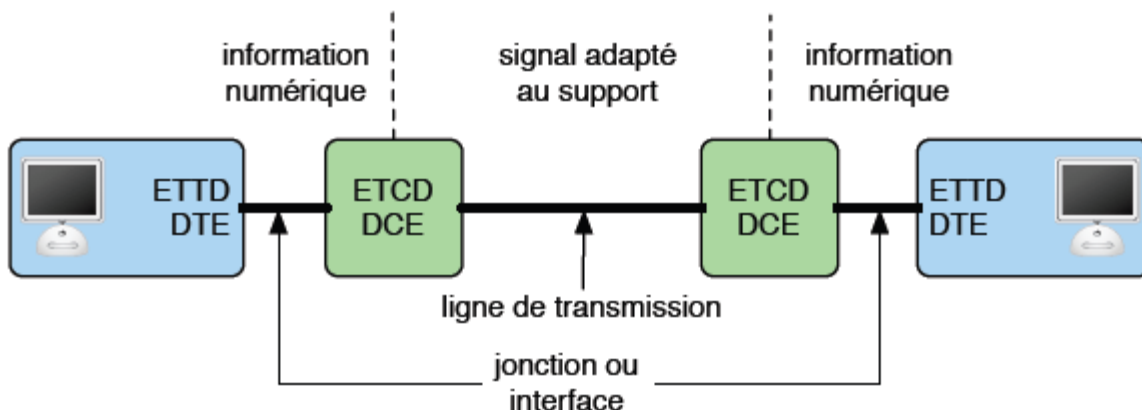
Chapitre 3 : Généralités sur la transmission de données

Les supports physiques ne peuvent pas acheminer directement, sans transformation, des 0 et des 1. On doit effectuer une adaptation au support utilisé. On doit les coder à nouveau.

1) Schéma d'une liaison entre Emetteur et Récepteur

Une donnée est soit discrète soit analogique. Dans le cas de donnée discrète, la numérisation est juste un codage des données. Dans le cas des données analogiques, la numérisation est l'échantillonnage, la quantification et le codage. Une transmission de données met en œuvre des calculateurs d'extrémité et des éléments d'adaptation du signal.

Le schéma générique d'une transmission est donné à la figure ci-dessous.



ETTD : Equipement Terminal de Traitement de Données ou DTE

ETCD : Equipement Terminal du Circuit de Données ou DCE.

Les données émises par un ETTD sont des suites de 0 et 1.

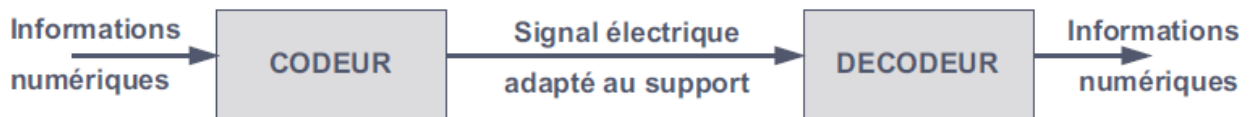
2) Transmission en bande de base et large bande

Selon la distance qui sépare les ETTD Emetteurs et les ETTD Récepteurs, on parlera de transmission en bande de base ou en large bande. La transmission

en bande de base a une distance limitée tandis que la transmission en large bande peut se faire sur de longue distance.

Chapitre 4 : Transmission en bande de base

- 1) Principe : On représente 0 et 1 par des valeurs de tension.
- 2) Utilisation : La distance entre Emetteur et Récepteur est limitée. Sinon on utilise un répéteur de signal.
- 3) Caractéristique :
 - Simplicité,
 - occupation de toute la bande passante.
- 4) schéma générique



- 5) valence d'un codage (N)

un codage dépend du nombre de niveaux utilisés pour coder le signal. C'est le nombre d'états significatifs. Ce nombre est appelé valence.

Exemple : Si on affecte +1 V à 1 et 0 V à 0, le codage est de valence $N=2$.

Si n est le nombre de bits transmis par un état significatif, $N = 2^n$.

Dans l'exemple ci-dessus, 1 bit est transmis par état significatif. La valence est $N = 2^1 = 2$.

- 6) Transition

Passage d'un état significatif à un autre état significatif.

- 7) Période significative

Le temps le plus petit entre deux transitions significatives.

8) Horloge

Les émissions et les réceptions sont rythmées par la même horloge notée H.

9) Exemples de codage

La transmission est rythmée par la même horloge côté émetteur et côté récepteur.

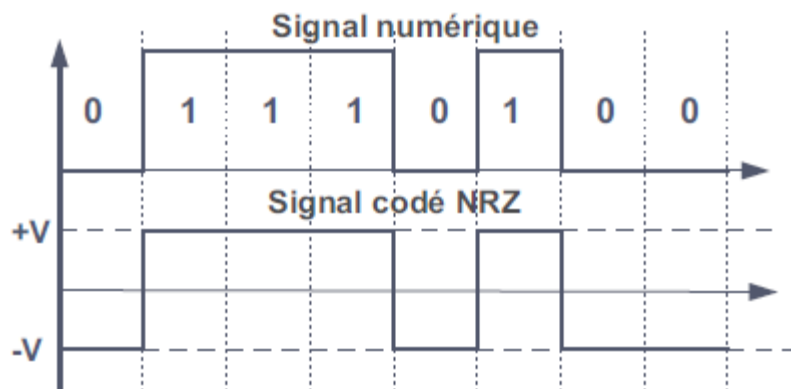
a) Codage binaire

On affecte $+V$ à un bit 1 et $0V$ à un bit à 0. C'est la transcription directe du signal.

C'est le codage le plus simple, non utilisé car il est difficile d'avoir la tension nulle.

b) Codage NRZ (No Return to Zero, non-retour à zero dans une même période de bit)

Ce codage élémentaire est à la base de tous les codes. Il s'agit du même code que le codage binaire mais on affecte $-V$ au bit 0 pour plus d'efficacité. Cependant, le spectre de ce signal est relativement large. Il présente un maximum de puissance à la fréquence zéro, ce qui correspond à une composante continue importante.



c) Codage RZ (Return to Zero)

Pour un codage RZ, on retourne en 0 dans une même période de bit.

d) Codage NRZI (No return to Zero Inverted)

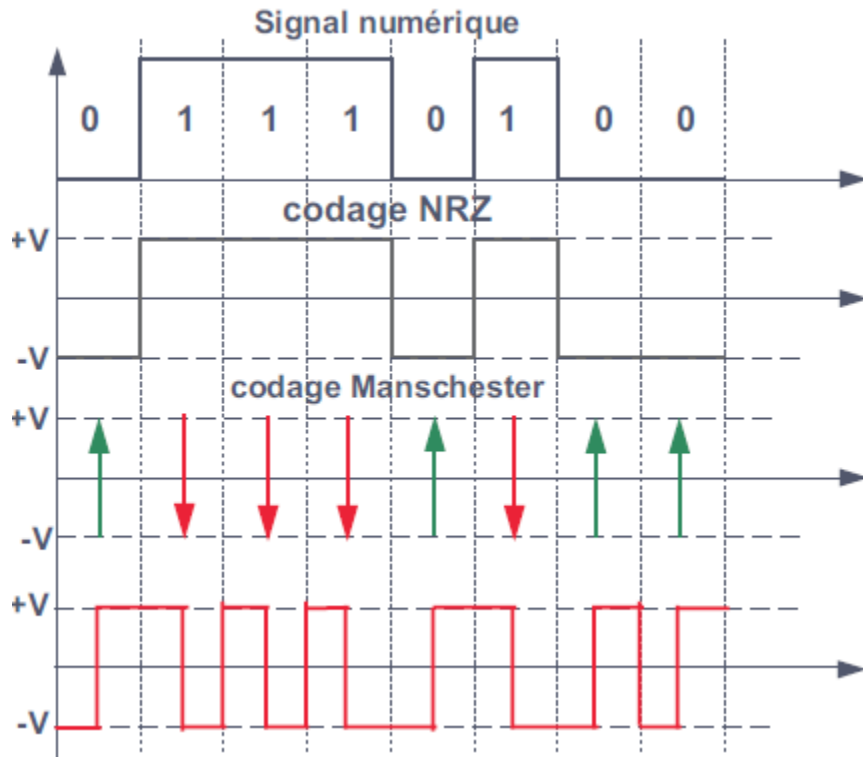
Choisissons de s'intéresser aux séries de 0.

Principe : le signal reste dans le même état pour un bit à 1 et change d'état pour un bit à 0.

e) Codage Manchester (codage biphase)

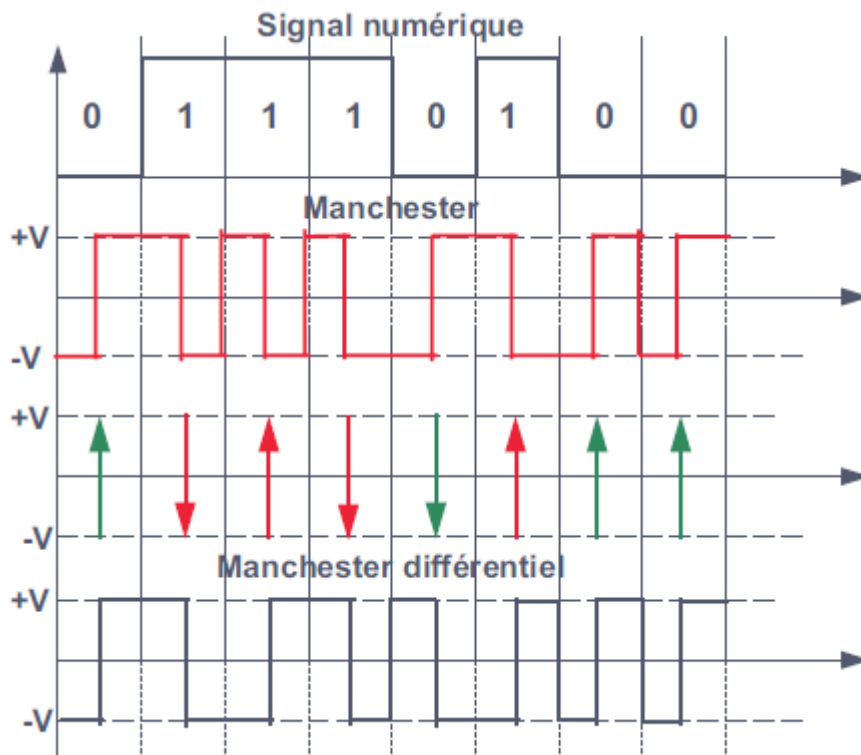
Le codage NRZ symétrise la valeur 1 et la valeur 0 par rapport à un niveau potentiel nul. Cependant ce codage a une composante continue non nulle et ne présente aucune transition lors de longues séquences de 0 ou de 1.

Le codage Manchester remédie à l'absence d'information de synchronisation avec une transition au milieu de chaque temps bit. La transition est croissante pour les 0 (High to Low), décroissante pour les 1 (Low to High). Le sens des transitions est significatif, ce qui pose des problèmes en cas d'inversion des fils de liaison. Multipliant les transitions, le codage Manchester a un spectre très large, il est utilisé dans les réseaux locaux de type Ethernet sur câble coaxial. La bande passante du support y est importante et gratuite et l'inversion de fils impossible.



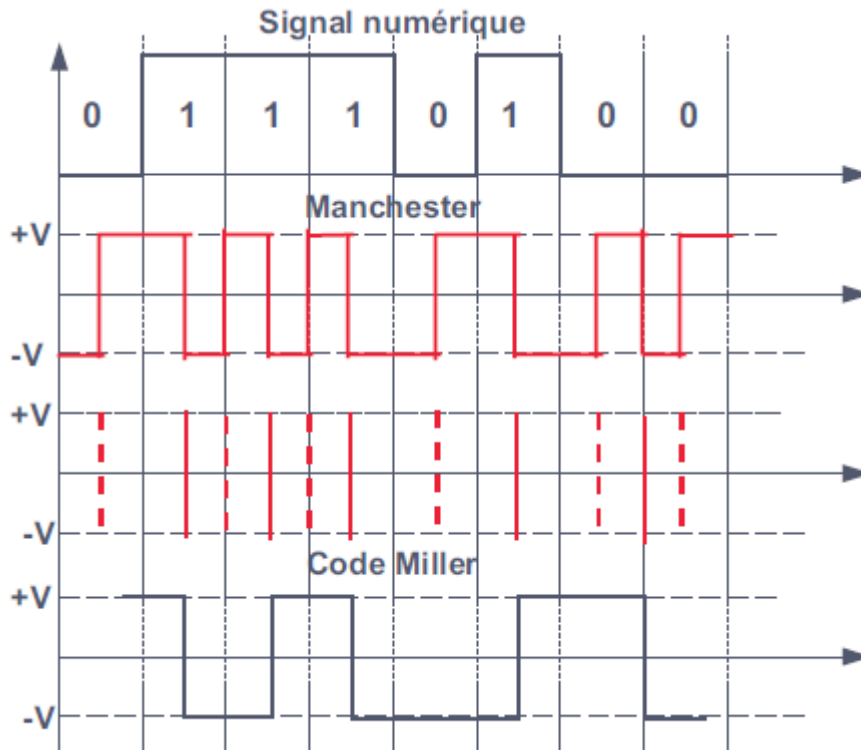
f) Codage Manchester Différentiel

Le codage Manchester différentiel résout le problème d'inversion des conducteurs. Chaque transition, au milieu du temps bit, est codée par rapport à la précédente. Si le bit à coder est 0 la transition est de même sens que la précédente, si le bit est à 1 on inverse le sens de la transition par rapport à celui de la précédente. Ce codage résout la plupart des problèmes posés, mais son spectre est relativement large. Il est utilisé dans les réseaux locaux de type Token Ring.



g) Codage Miller

Pour réduire le spectre on peut, à partir du Manchester simple, supprimer une transition sur deux, que celle-ci soit ou non significative, on obtient alors le code dit *Delay Mode* ou Miller . En appliquant cette règle, on constate que les 1 ont une transition au milieu du temps bit et les 0 pas de transition. Mais un 0 suivi d'un 0 a une transition en fin du temps bit.



h) Codage AMI (Alternate Mark Inversion)

C'est un codage à 3 niveaux de tension : $+V$, 0 et $-V$.

0 est codé par 0V ; 1 est codé par $+V$ ou $-V$.

Ce codage est inefficace lorsqu'il y a les longues séries de 0.

i) Codage HDB3 (Hute Densité Bipolaire d'ordre 3)

Ce codage appartient à la famille de codage HDBn, pour régler le problème des successions de n zéros (la succession de 1 est réglée avec l'alternance).

Principe :

On utilise des bits de bourrage et des bits de viol (B : bourrage et V : viol).

Une suite de $(n+1)$ zéros est codée par :

- (a) Une suite de n zéros suivi d'un bit de viol V
- (b) Une suite formée d'un bit de bourrage B, de $(n-1)$ zéros, suivi d'un bit de viol V ? B et V ayant même polarité.

Règle :

- on choisit (a) si le nombre de bits 1 suivant le dernier bit de viol est impair. Sinon on choisit (b).
- le premier bit à 1 suivant un V est codé avec la valeur inverse du V précédent.
- Par convention, la suite est précédée d'un V.

Exemple HDB3

On utilisera les symboles +, - pour les bits à 1 ;

0, B^+ , B^- , V^+ , V^- pour les bits à 0.

Signal : 1 1 0 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0

- La suite est précédée d'un V.

Codage :

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

+ - 0 + **0 0 0** V^+ - 0 + **B^- 0 0** V^-

0 0 0 V^+ : car c'est la première série de 4 zéros. Par convention, la série est précédée d'un V.

Le nombre de 1 est 3 (impair) donc c'est le type (a). Pour que cela soit un viol, il faut que cela soit V^+ car si on aurait mis V^- , on l'aurait pris pour un 1 normal car aurait altéré avec le dernier 1.

Ainsi avec le choix du + pour le premier 1 de la série, le viol précédent est un V^- .

B^- 0 0 V^- : Après le dernier viol, il y a 2 bits à 1 (pair), donc on choisit le type (b).

La forme est donc B 0 0 V. Ici c'est un **B^- 0 0** V^- pour respecter l'alternance.

Autre exemple :

1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0

+ 0 0 0 V^+ 0 - + - 0 0

Chapitre 5 : Transmission en large bande

En transmission large bande, le spectre du signal numérique est translaté autour d'une fréquence centrale appelée **porteuse**. La translation de spectre résout les deux problèmes posés par la transmission en bande de base : dispersion du spectre (étalement du signal) et la monopolisation du support qui interdit le multiplexage. Elle est réalisée par un organe appelé modulateur. En réception le signal doit subir une transformation inverse, il est démodulé. Le modem, contraction de **modulation/démodulation**, est un équipement qui réalise la modulation des signaux en émission et leur démodulation en réception.

1) Principe :

La dégradation du signal avec la transmission en bande de base est rapide, la distance franchissable est limitée à quelques km. Le signal sinusoïdal est plus résistant. D'où l'idée de substituer au signal impulsionnel, un signal sinusoïdal et de modifier l'un de ses paramètres en fonction du signal numérique d'origine: c'est la modulation. La modulation permet de différencier un 0 d'un 1 pendant la transmission, car il s'agit de transporter des 1 et des 0 et pourvoir les récupérer après.

On couple deux signaux :

- Un signal qui se propage bien sur de longues distances, en haute fréquence appelé porteuse ;
- Le signal à transmettre appelé le modulant (basse fréquence).

La porteuse est une onde sinusoïdale $u(t) = A_0 \sin(w_0 t + \varphi_0)$.

$w_0 = 2\pi f_0$ avec f_0 la fréquence de la porteuse.

Un signal sinusoïdal est caractérisé par :

- Son amplitude A_0
- Sa fréquence f_0
- Sa phase φ_0

2) Types de modulation

Sur un signal sinusoïdal, on peut faire varier :

- l'amplitude A_0 , c'est la modulation d'amplitude (**ASK**, *Amplitude Shift Keying*) ;
- la fréquence f_0 , c'est la modulation de fréquence (**FSK**, *Frequency Shift Keying*) ;
- la phase φ_0 , c'est la modulation de phase (**PSK**, *Phase Shift Keying*).

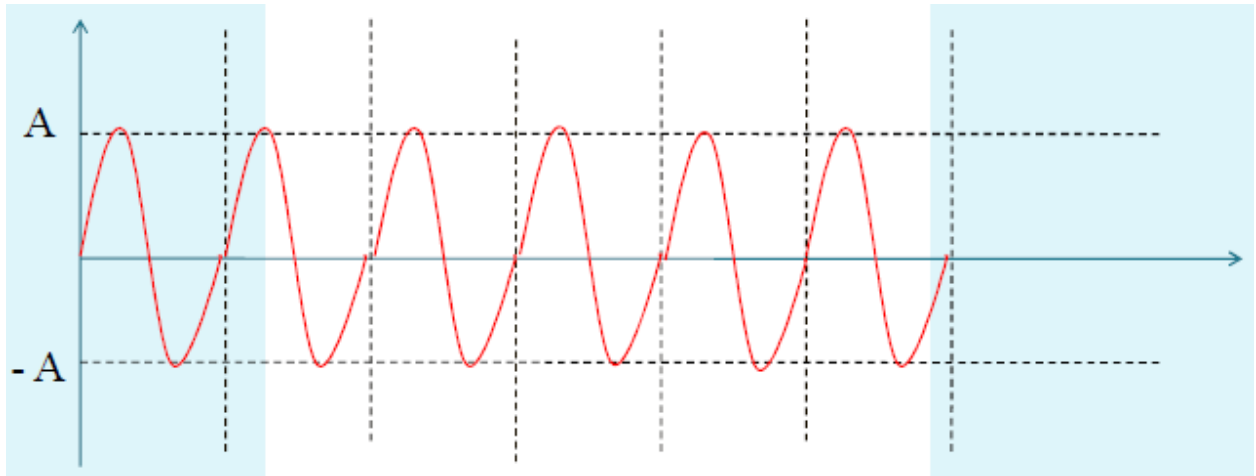
3) Modulation d'amplitude

On effectue un produit de l'amplitude de la porteuse par un réel k traduisant 1 ou 0. La fréquence et la phase restent inchangées.

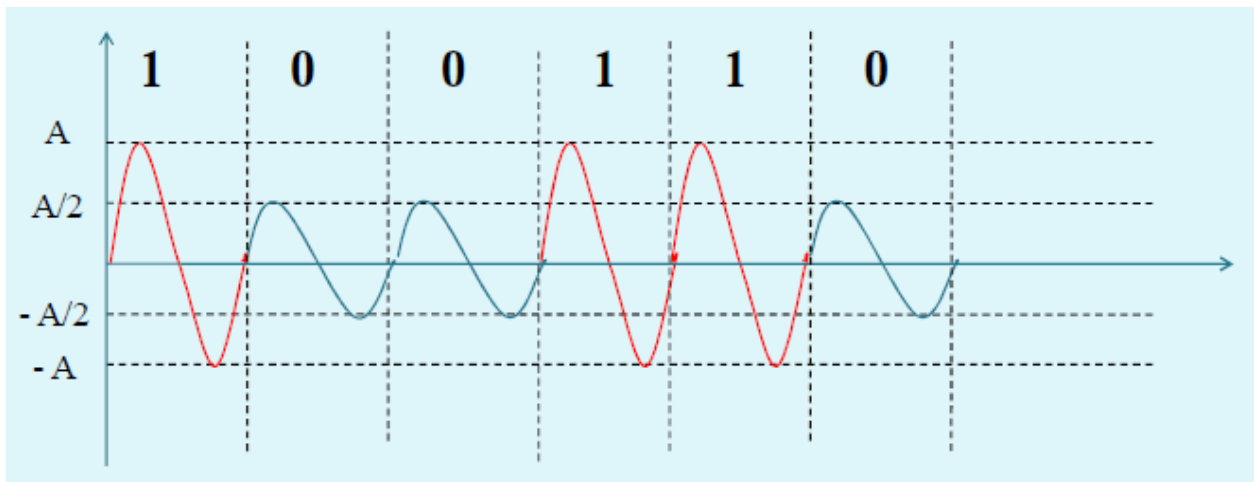
Exemple :

Pour une porteuse $s(t) = A \sin(2\pi f t)$ et

Supposons que $k=1$ pour désigner 1 ($s(t) = A \sin(2\pi f t)$) et que $k=1/2$ pour désigner 0 ($s(t) = \frac{A}{2} \sin(2\pi f t)$), on a le signal modulé suivant :



Porteuse



Signal modulé

Ce type de modulation est utilisé pour les ondes radios (AM).

L'amplitude étant représentative de l'information, la modulation d'amplitude est très sensible aux bruits parasites, elle n'est pratiquement utilisée qu'en combinaison avec la modulation de phase.

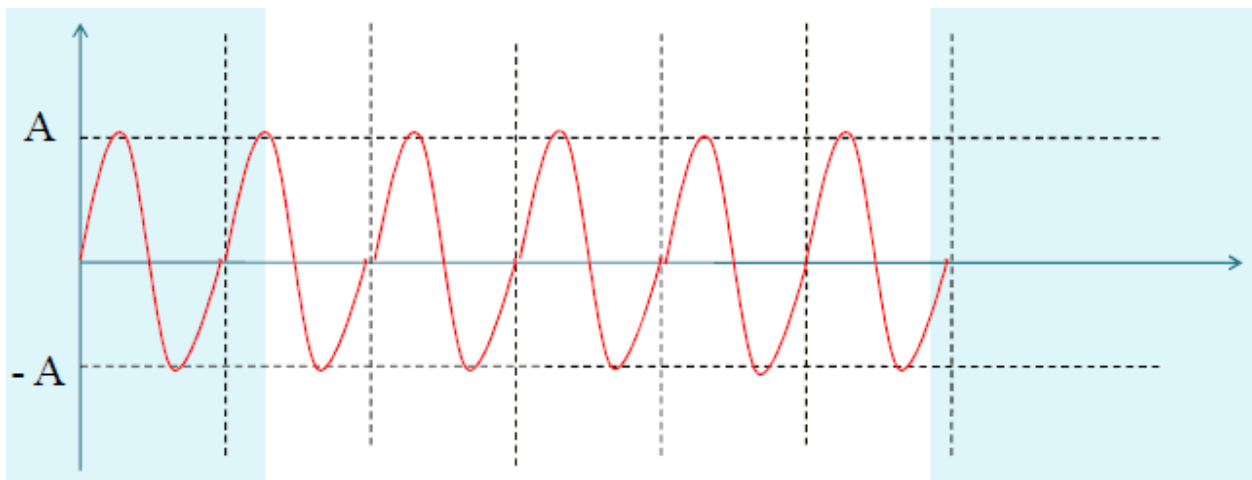
4) Modulation de fréquence

C'est la fréquence qui est modifiée pour signifier un 1 ou un 0. La phase et l'amplitude restent inchangées.

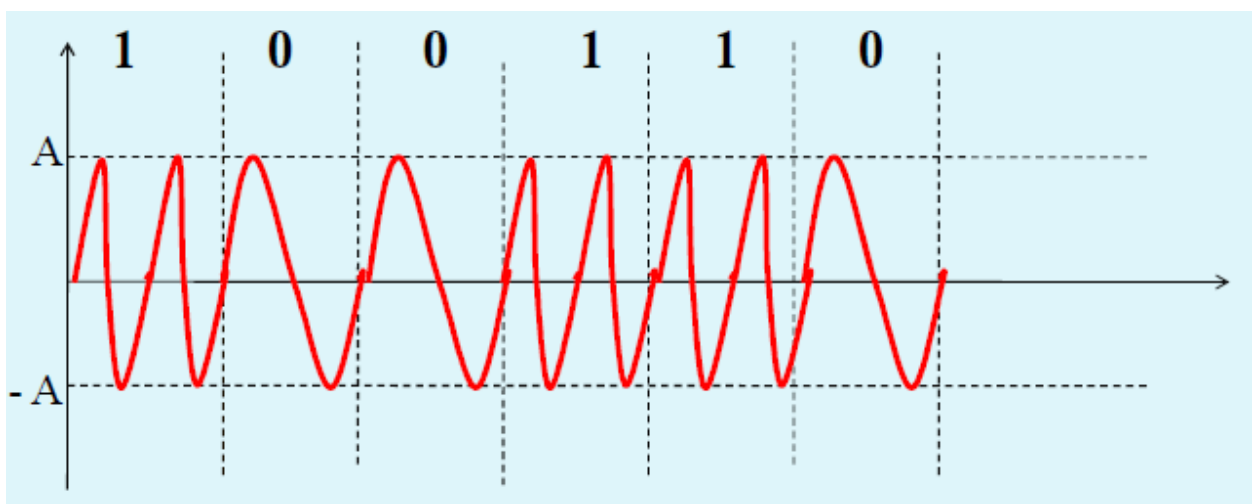
Exemple :

Pour une porteuse $s(t) = A\sin(2\pi f)$ et

Supposons que la fréquence est multipliée par 2 pour désigner 1 ($s(t) = A\sin(2\pi 2f)$) et qu'elle reste inchangée pour désigner 0 ($s(t) = A\sin(2\pi f)$), on a le signal modulé suivant :



Porteuse



Signal modulé

Ce type de modulation est utilisé pour les ondes radios (AM).

La technique de la modulation de fréquence est particulièrement simple à mettre en œuvre. Elle est très résistante aux bruits, mais la grande largeur du spectre du signal résultant la limite au faible débit.

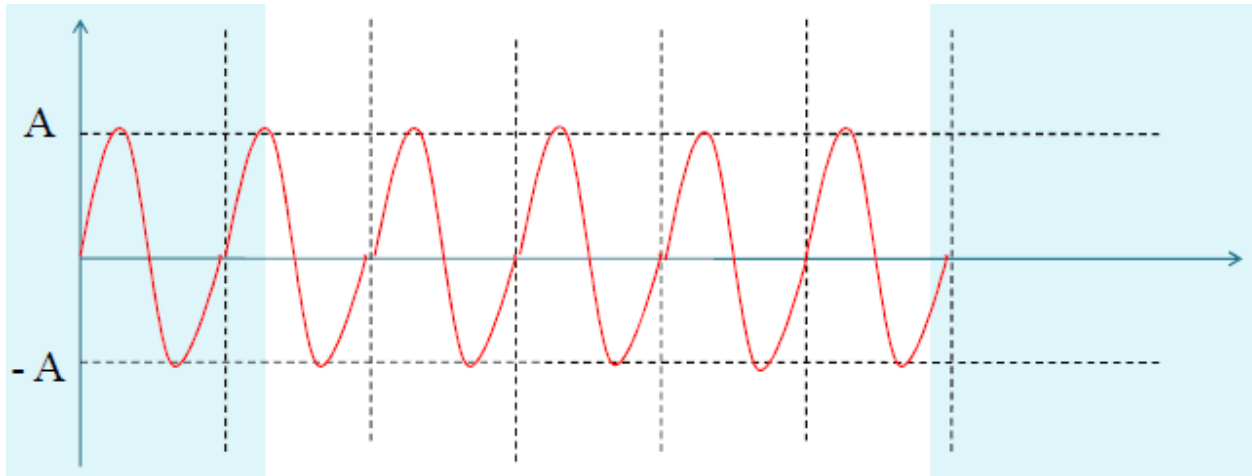
5) Modulation de phase

C'est la phase qui est modifiée pour signifier un 1 ou un 0. La fréquence et l'amplitude restent inchangées. On précise par rapport à la phase de la porteuse, celle qui correspondra au bit 1 et celle qui correspondra au bit 0.

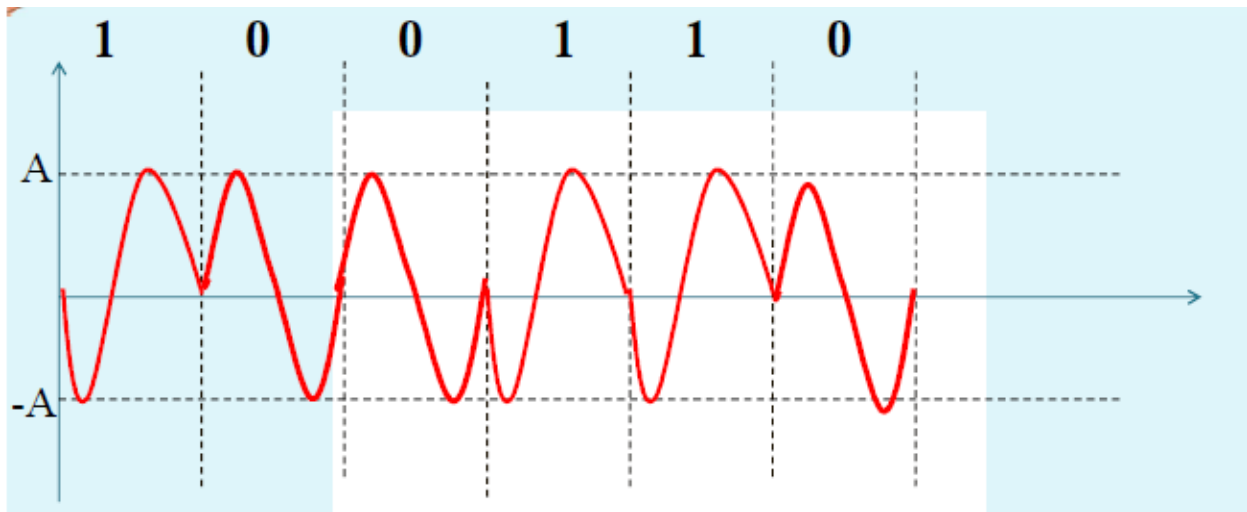
Exemple :

Pour une porteuse $s(t) = A\sin(2\pi f)$ et

Supposons que la phase est la même que celle de la porteuse (φ_0) pour désigner 0 ($s(t) = A\sin(2\pi f + \varphi_0)$) et qu'elle est égale à $\varphi_0 + \pi$ pour désigner 1 ($s(t) = A\sin(2\pi f + \varphi_0 + \pi)$), on a le signal modulé suivant :



Porteuse



Signal modulé

6) Combinaison de modulation

Dans les trois types de modulation vus, une période transporte un seul bit. On peut transporter deux bits en seule période en combinant les modulations. Cela a pour avantage d'augmenter le débit.

Caractéristiques d'une transmission

1) Définitions et théorèmes

- Transition : passage d'un état significatif à un autre état significatif.
- Valence : $N = 2^n$ où n est le nombre de bits transmis par état significatif.

Exemple : $n=1$, $N=2$ Valence=2. Un état transporte 1 bit.

$n=2$, $N=4$, Valence = 4. Un état transporte 2 bits. (Cela est possible en combinant la modulation de fréquence et modulation d'amplitude).

- Temps élémentaire T_e : plus petite durée entre 2 transitions.

Remarque : plus n est grand, plus rapide est la modulation.

- Rapidité de modulation R : nombre maximum de transitions entre en 1 seconde. R s'exprime en baud.

$$R = \frac{1}{T_e}$$

R est donc une quantité d'informations transmises.

- Débit binaire D : nombre maximum de bits transmis par seconde. Si N est la valence,

$$N = 2^n$$

$$D = nR = n \times \frac{1}{T_e}$$

D est en bits ; bits/s est équivalent au baud.

Exemple :

$N=4=2^2$ (2 bits par transition)

Si le nombre de transitions par seconde est 1, on a :

$R=1$ baud

$D=2$ bits/s.

➤ Bande passante

Tout signal transporté subit des affaiblissements dus:

- Aux interférences sur le canal
- Aux intempéries.

On appelle bande passante (figure 4.6) l'espace de fréquences tel que tout signal appartenant à cet intervalle, ne subisse, au plus, qu'un affaiblissement déterminé par rapport à un niveau de référence.

L'affaiblissement, exprimé en décibel (dB), est donné par la relation :

$$A = 10 \log_{10} P_1 / P_0$$

P_1 : puissance du signal en sortie

P_0 : puissance du signal de référence

La bande passante est généralement définie pour une atténuation en puissance de moitié, ce qui correspond à -3 dB.

La largeur de bande d'un signal correspond à la bande passante minimale que le système doit posséder pour restituer correctement l'information. Ainsi, la bande passante qualifie le système, et la largeur de bande qualifie le signal. Notons que le terme de bande passante est utilisé non seulement pour désigner un espace fréquentiel (Bande Passante ou BP en Hz), mais aussi pour qualifier le débit binaire d'un système (Bande Passante exprimée en bit/s).

$W=f_2-f_1$, où $[f_1 ; f_2]$ est l'intervalle où la puissance du signal est supérieure à $P_0/2$.

Remarque : la bande passante de la voix humaine est $w=3100$ Hz ; $f_1=300$ Hz et $f_2=3400$ Hz.

Théorème de Nyquist :

La rapidité de modulation R ne peut pas dépasser une valeur maximale R_{\max} :

$R \leq R_{\max}$ et $R_{\max}=2W$, W est la bande passante du signal.

En pratique, R_{\max} est environ égal à $1,25W$.

Exemple : pour la voie humaine, $R \leq 2 \times 3100$ (=6200 bauds).

2) Bruit et qualité d'un signal.

On distingue 3 types de bruits :

- Bruits déterministes (dépendant des caractéristiques physiques du support)
- Bruits aléatoires (perturbations accidentelles)
- Bruits blancs (agitations thermiques).

On mesure la qualité d'un signal par le rapport signal/bruit (S/B) dont l'unité est le décibel (dB).

$$(S/B) = 10 \log_{10}(S/B)$$

- Décibel : le décibel (dB) est l'unité du rapport signal/bruit ramené à l'échelle logarithmique parlant du rapport réel de puissance S/B .
- Théorème de Shannon : le nombre maximal de bits à transporter par transition est lié (et limité) par le rapport signal/bruit.

$$n_{\max} = \log_2 \sqrt{1 + (S/B)}$$

Or $D=nR$.

Cette relation limite le débit binaire D .

- Le débit binaire maximal est appelé Capacité du support (C).

$$C = n_{max} \times R_{max} = 2w \log_2 \sqrt{1 + (S/B)}$$

$$C = w \times \log_2(1 + (S/B))$$

Exemple : le support est une ligne téléphonique avec $w=3100$ Hz.

Quelle est la capacité d'un tel support pour un rapport Signal/Bruit égal à 20 dB ?

3) Types et sens d'une transmission

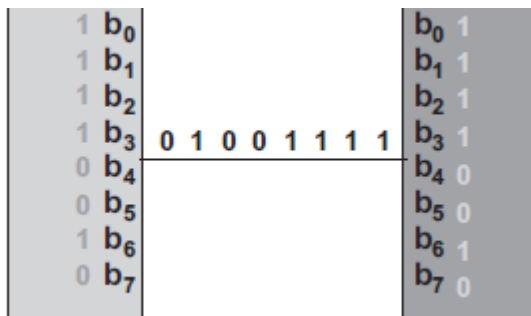
- Types de transmission

Il existe deux types de transmission :

- La transmission en série : on envoie les impulsions des signaux les uns à la suite des autres. On a besoin que d'un seul fil de transmission.
- La transmission en parallèle : on utilise plusieurs fils sur lesquels les impulsions sont transmises simultanément. Les bits sont alors regroupés selon le nombre de fils.

b_0	1	1	1	b_0
b_1	0	1	1	b_1
b_2	0	0	1	b_2
b_3	1	0	1	b_3
b_4	0	1	0	b_4
b_5	0	0	0	b_5
b_6	1	1	1	b_6
b_7	0	0	0	b_7

Transmission parallèle



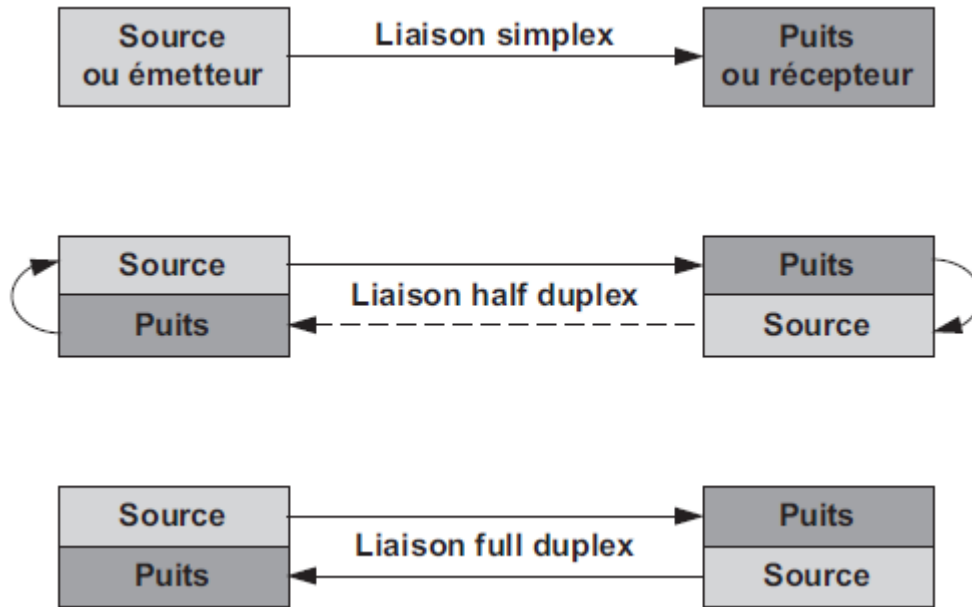
Transmission série

La transmission en parallèle est plus rapide mais peu commode pour une longue distance. En plus, il faut synchroniser les fils. Elle est surtout utilisée sur la carte mère de l'ordinateur, pour les liaisons entre les éléments reliés à la carte mère.

➤ Sens de transmission

Il existe 3 sens de transmission :

- Simplex : dans un seul sens (radio, TV...)
- Half duplex : dans les deux sens mais alternés (talkie-walkie)
- Full duplex : dans les deux sens de façon intégrale (réseau)



Sens de transmission

4) Synchronisation d'une transmission en série

Toute émission de donnée par un Emetteur (H_E) ou toute réception par un Récepteur (H_R) est rythmée par une horloge interne (H_E pour l'émetteur et H_R pour le récepteur).

L'émetteur émet au rythme de son horloge H_E qu'il transmet avec le signal à transmettre.

Le récepteur peut cadencer son horloge H_R à H_E ou ne pas le faire.

Dans le premier cas, $H_R = H_E$: la transmission est synchrone.

Dans le deuxième cas, elle est asynchrone. Le récepteur travaille avec sa propre horloge ($H_R \neq H_E$). D'où le mode de transmission asynchrone est utilisé pour les transmissions de caractères.

5) Transmission asynchrone

Une trame est un groupe de bits contenant les bits de l'information (le caractère) à émettre et des bits de contrôle (nécessaire dans toute transmission asynchrone).

L'émission et la réception n'est pas continue dans le temps. La ligne de transmission est au repos pour une durée non maîtrisée entre l'envoi de 2 trames.

Principe

- Un caractère émis est précédé d'un bit spécial indiquant le début de l'envoi (Bit Start :BD) ou Bit de Début.
- Puis vient la séquence des bits du caractère émis
- La fin d'émission du caractère est marquée par un ou plusieurs bits d'arrêt (Bit Stop :BA) ou Bit d'Arrêt.
- Entre la fin du caractère et le premier bit BA s'intercale un bit de contrôle (Bit de parité par exemple) : BC.

Les Bits Stops sont de même niveau logique que l'état Repos de la ligne, Niveau Haut ; ainsi le BD est un niveau Bas.

Un bit de parité est un bit de contrôle (des erreurs qui peuvent survenir durant la transmission). La présence d'un bit BC est facultative.

Si le codage d'un caractère se fait avec 7 ou 8 bits, une trame contient :

Avec 7 bits, 1 (BD)+7 (caractère)+1 (BC, facultatif)+1 (BA), soit au moins 9 bits.

Avec 8 bits, la trame contient au moins 10 bits.

6) Transmission synchrone

Dans ce cas, $H_E = H_R$.

En pratique, cette synchronisation des horloges peut être élaborée :

- Directement à partir de H_E alors transmise en même temps que les données sur une ligne séparée
- Par reconstitution à partir des instants de transition du signal suivant le type de modulation.

a) Trame synchrone

La longueur d'une trame n'est plus limitée à un caractère comme dans le cas asynchrone. Elle est quelconque.

La structure d'une trame synchrone est la suivante :

Synchronisation 8 bits	Commande 8 bits	Blocs de n caractères de données	Contrôle 8 bits
-----------------------------------	----------------------------	---	----------------------------

b) Protocoles et procédures synchrones

Une transmission synchrone est souvent associée à un partage de support physique par différents systèmes émetteurs. Il est alors nécessaire d'utiliser des trames spécifiques pour contrôler et superviser la transmission. :

- Etablissement d'une liaison
- Procédure d'acquiescement ou rejet de trame
- Procédure de contrôle de flux etc.

Il y a donc trois phases :

- Etablissement de la liaison
- Transfert des données
- Libération de la liaison au profit d'un autre.

7) Multiplexage

Prenons le cas du réseau téléphonique.

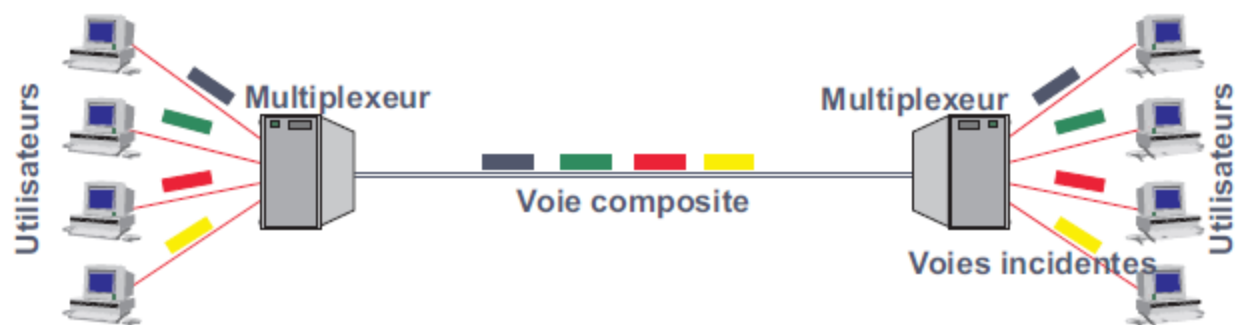
Le principe du réseau téléphonique est que quand un abonné est en communication avec un autre abonné, à ce moment les deux combinés sont reliés physiquement par un fil.

Il est impossible de relier chaque abonné à la centrale téléphonique, d'où la solution suivante adoptée.

Chaque lot d'abonnés dispose d'une borne relai et chaque abonné est relié physiquement à cette borne.

Cette borne est reliée physiquement à la centrale en passant éventuellement par une borne de plus grande importance, utilisant un unique fil.

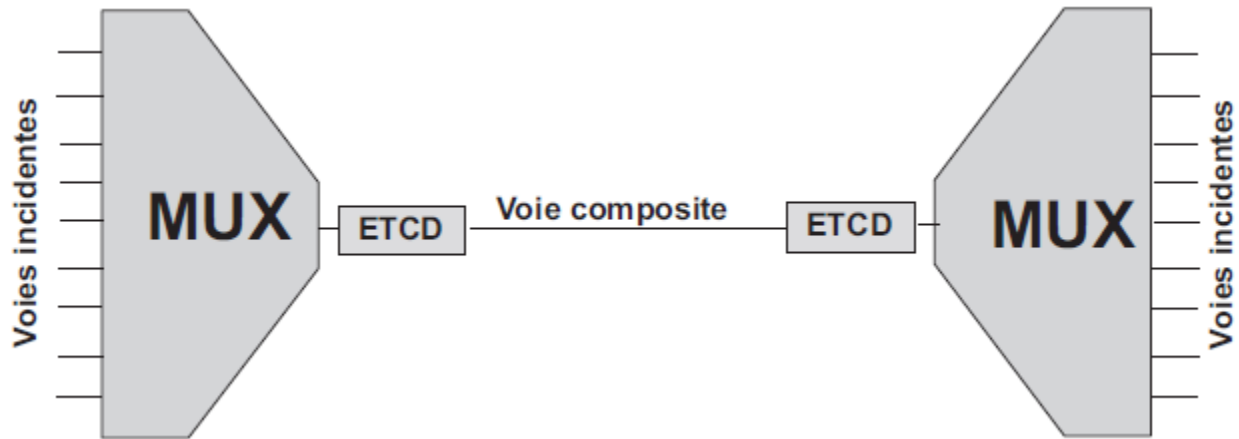
Une ligne reliant deux bornes intermédiaires ou une borne d'ilots à la centrale va devoir être utilisées par plusieurs abonnés. La ligne est partagée par plusieurs utilisateurs.



a) Définition

Lorsque plusieurs voies de transmissions utilisent pour la suite de la transmission, une unique voie, on dit qu'on fait un multiplexage de voies.

A l'arrivée, le procédé inverse est appelé démultiplexage pour retrouver les informations transmises par les différentes voies incidentes.



Le problème posé est comment partager cette unique voie ?

b) Types de multiplexage

➤ Multiplexage temporel (TDM)

On utilise la voie à tour de rôle.

Remarque : Pour qu'un multiplexage soit réalisable, il faut que le débit autorisé de la voie unique soit plus important que celui des voies incidentes.

Deux cas :

- Toutes les voies incidentes ont accès au support pour une même durée dt (STDM, S pour synchrone). Dans ce cas, la voie est occupée même si une voie incidente n'émet pas. Les autres doivent attendre leur tour.
- Multiplexage statique : si une source (voie incidente) ne veut pas émettre, on saute son tour et on passe directement à la voie suivante.

Remarque : les données à transmettre sont divisées en paquets (unité à transmettre en une seule fois).

➤ Multiplexage fréquentiel (FDM)

Toutes les voies incidentes émettent en même temps mais à des fréquences différentes.

Remarque : il faudrait gérer le problème de gestion des fréquences trop proches l'une de l'autre.

➤ Multiplexage en longueur d'onde (WDM)

Ce sont les longueurs d'onde qui sont partagés par les voies incidentes.

Chapitre 6 : Contrôle des erreurs de transmission

D'une manière générale on doit, lors d'une transmission de données, s'assurer que les données reçues n'ont pas été altérées durant la transmission. Plusieurs facteurs peuvent modifier le contenu des données. Les uns sont d'origine humaine, le contrôle d'intégrité concerne alors la sécurité des données. Les autres sont d'origine physique, le contrôle d'intégrité porte alors le nom de contrôle d'erreur.

Taux d'erreur binaire

Les rayonnements électromagnétiques, les perturbations propres au système (distorsions, bruit...), des intempéries, des tensions instables peuvent modifier les informations transmises (bits erronés). Compte tenu de l'extension des réseaux et de l'utilisation massive de la fibre optique, la perte de la synchronisation des horloges est, aujourd'hui, la principale source d'erreurs.

On appelle taux d'erreur binaire ou BER (*Bit Error Rate*) le rapport entre le nombre d'informations (bits) erronées reçues et le nombre d'informations (bits) transmises.

$$teb = \frac{\text{nbre bits erronés}}{\text{nbre de bits transmis}}$$

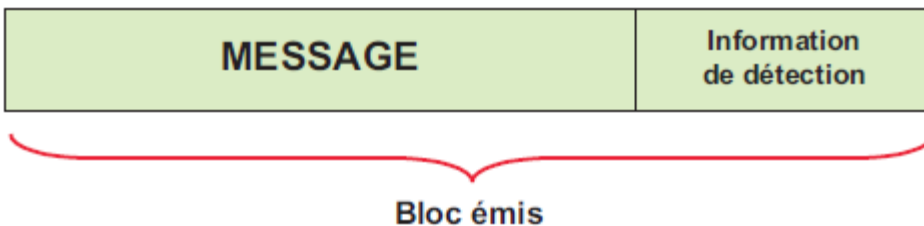
Soit par exemple la suite de bits « 1001101 » qui est reçu « 1001001 ».

Le message reçu diffère d'un bit du message émis. Le nombre de bits émis étant 8 bits, le taux d'erreur binaire est $teb = 1/8 = 0,125$.

Il faut être capable de détecter ces erreurs de transmission et si possible les corriger ou demander une réémission des même données.

On appelle détection d'erreur les mécanismes mis en œuvre pour que le système destinataire puisse vérifier la validité des données reçues. La détection d'erreur repose sur l'introduction d'une certaine redondance dans l'information transmise. Quatre techniques peuvent être mises en œuvre pour détecter et éventuellement corriger les erreurs. Parmi ces techniques, on a :

- La **détection d'erreur** par clé calculée : une information supplémentaire (clé) déduite des informations transmises est ajoutée à celles-ci. En réception, le récepteur recalcule la clé, si le résultat obtenu correspond à la clé reçue les données sont réputées exactes, sinon le récepteur ignore les données reçues et éventuellement en demande la retransmission (reprise sur erreur).



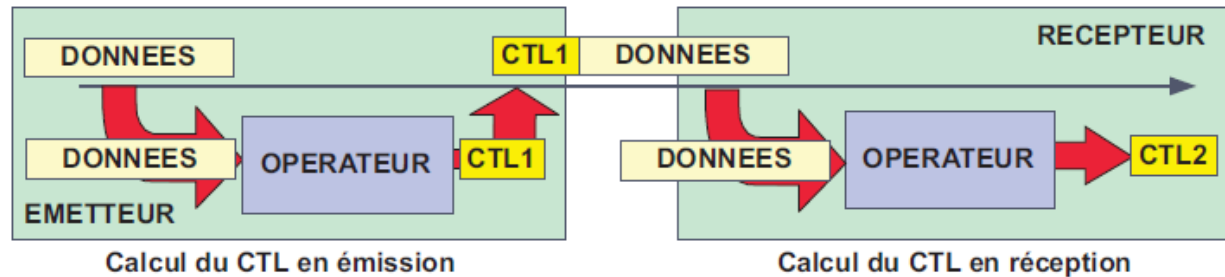
- La **détection et correction d'erreur par code** : cette technique consiste à substituer aux caractères à transmettre, une combinaison binaire différente du codage de base (code autocorrecteur).

1) Détection d'erreur par clé calculée

Principe

Dans les systèmes à clé calculée, une séquence de contrôle (CTL1) déduite d'une opération mathématique appliquée au message à émettre est envoyée

avec le message. Le récepteur effectue la même opération. Si le résultat trouvé (CTL2) est identique à la clé calculée par la source (CTL1) le bloc est réputé exact, dans le cas contraire le bloc est rejeté.



a) Technique du bit de parité

La technique du **bit de parité** consiste à ajouter, à la séquence binaire à protéger, un bit, telle que la somme des bits à 1 transmis soit paire (bit de parité) ou impaire (bit d'impairité). L'émetteur et le récepteur s'entendent sur la parité utilisée pour les transmissions les concernant.

Parité paire : si le nombre de 1 est impair, le bit de parité prend la valeur 1 ; sinon il prend la valeur 0.

Exemple : (le bit de contrôle est en gras dans chaque cas)

0100101**1**

0100001**0**

Parité impaire : si le nombre 1 est impair, le bit de contrôle est 0 sinon le bit de contrôle est 1.

Exemple : (le bit de contrôle est en gras dans chaque cas)

0100101**0**

0100001**1**

S'il existe des erreurs lors de la transmission, la valeur du bit de parité peut aussi changer.

Si la valeur de la parité a changé, il y a eu sûrement erreur de transmission, sinon il se peut qu'il y ait erreurs mais difficile à détecter par ce moyen.

Exemple :

Transmis (01001011) ; reçu (01001001) : en parité paire, il y a erreur sûre.

Transmis (01001011) ; reçu (10001011) : en parité paire, la parité est correcte pourtant il y a eu deux erreurs.

On transmet le caractère complété par le bit de parité. La détection d'erreur est donc sûre lorsque l'altération ne concerne qu'un seul bit et que le bit de parité n'est pas lui-même altéré. Le contrôle est donc peu fiable.

b) Contrôle de parité par bloc

Pour améliorer le contrôle des erreurs utilisant la parité, on utilise les contrôles par VRC et LRC.

VRC : *Vertical Redundancy Check*), vérification par redondance verticale

LRC: *Longitudinal Redundancy Check*, vérification par redondance longitudinale

Principe du contrôle par bloc

Le contrôle de l'intégrité du bloc se fait de manière verticale (VRC) où on contrôle l'intégrité caractère par caractère et de manière longitudinale (LRC) par bit de même rang dans les caractères.

Exemple : le mot « OSI », avec un caractère codé sur 7 bits.

Parité paire

O	1	0	0	1	1	1	1	1	
S	1	0	1	0	0	1	1	0	
I	1	0	0	0	0	1	1	1	
	1	0	1	1	1	1	1	0	LRC
								VRC	

On transmet chaque caractère complété par le code de parité du caractère. Puis à la fin, on transmet le caractère LRC du bloc.

Caractère à transmettre	bit de parité	Caractère à transmettre	bit de parité	...	Caractère LRC	bit de parité
-------------------------	---------------	-------------------------	---------------	-----	---------------	---------------

Contrôle des erreurs à la réception

Une erreur : Les bits reçus sont ci-dessous, avec une erreur de transmission.

O	1	0	0	1	0	1	1	1	
S	1	0	1	0	0	1	1	0	
I	1	0	0	0	0	1	1	1	
	1	0	1	1	1	1	1		LRC
								VRC	

La parité de la première ligne et celle de la cinquième colonne ne correspondent pas aux éléments correspondants des VRC et LRC. Il y a eu erreur de transmission et on sait qu'elle est située à la position (1 ;5) dans le tableau de données.

Une erreur par caractère est aussi détectable et on peut les corriger. On suppose que les bits de contrôle ne sont pas altérés.

Deux erreurs de transmission

Dans ce cas, le bit de parité est correct, donc VRC est correct. C'est les bits LRC qui ne correspondent pas. Mais on ne pourra pas localiser les erreurs. On pourra juste trouver les deux colonnes comportant des erreurs.

O	1	0	1	1	0	1	1	1	
S	1	0	1	0	0	1	1	0	
I	1	0	0	0	0	1	1	1	
	1	0	1	1	1	1	1		LRC
								VRC	

Autre

situation identique à la précédente

O	1	0	0	1	1	1	1	1	
S	1	0	0	0	1	1	1	0	
I	1	0	0	0	0	1	1	1	
	1	0	1	1	1	1	1		LRC
								VRC	

c) Contrôle par code cyclique (CRC)

Principe :

Une trame ou ensemble de trames de bits est considéré comme un polynôme dont les coefficients des termes sont des valeurs de bits.

Par exemple :

Trame : 1101011 sera représentée par $X^6 + X^5 + X^3 + X + 1$.

$P(X) = X^6 + X^5 + X^3 + X + 1$ est un polynôme représentant la trame.

- On utilise un polynôme générateur $G(X)$ avec lequel Emetteur et Récepteur se sont entendus pour tout envoi et réception. On note k le degré de G .
- Pour permettre une division, on décale $P(X)$ vers la gauche de $d^{\circ}P+k$.
- On divise (en arithmétique booléenne) $T(X)$ par $G(X)$ et on retient le reste $R(X)$ de cette division
- On remplace les k bits à 0 de $T(X)$ par les coefficients de $R(X)$. cela donne la trame $T'(X)$ à émettre.

Remarque : en arithmétique, l'addition et la soustraction sont la même opération.

Addition		
+	0	1
0	0	1
1	1	0

Soustraction		
−	0	1
0	0	1
1	1	0

Exemple : soit à transmettre la trame 1101011011.

$$P(X) = X^9 + X^8 + X^6 + X^4 + X^3 + X^1.$$

Le polynôme générateur choisi est $G(X) = X^4 + X + 1$ et $d^{\circ}G = k = 4$.

Le nouveau message est 11010110110000. Ce nouveau message est représenté par $T(X) = X^{13} + X^{12} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 = P(X) * X^4$

On effectue ensuite la division par G .

Le reste obtenu est $R(X) = X^3 + X^2 + X$ qui correspond à 1110.

Le message final à transmettre est 11010110111110

$$\text{Correspondant à } T'(X) = X^{13} + X^{12} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^3 + X^2 + X$$

A la réception, le récepteur divise $T'(X)$ par $G(X)$ et s'attend à trouver un polynôme divisible par $G(X)$ (reste 0). Si le reste est 0, on estime qu'il n'y a pas eu erreur de transmission ; sinon il y a eu erreur.

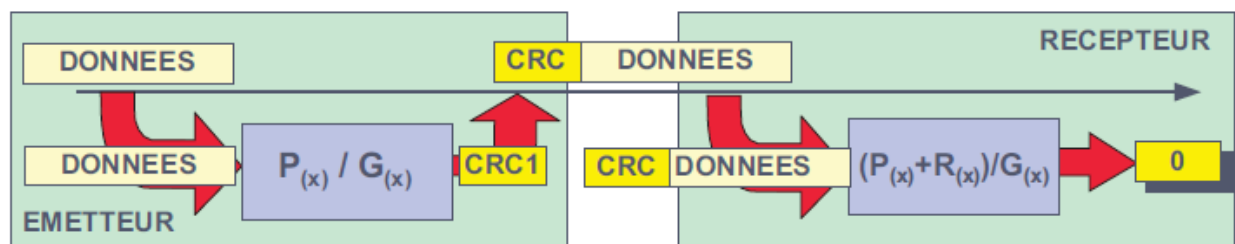
Ce qui est envoyé est donc $T'(X)$. $G(X)$ est déjà connu.

Remarque :

$T' : 11010110111110$

$G=10011$

Après la division de T' et G , on trouve que le reste est nul.



Quelques polynômes générateurs

CRC-12 : $X^{12} + X^{11} + X^3 + X^2 + X + 1$

CRC-16 : $X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$ ou $X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$

CRC-32 : $X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$ (utilisé dans les réseaux Ethernet).

2) Détection et correction d'erreur par code

Dans les systèmes autocorrecteurs, on substitue au mot à transmettre (mot naturel) un nouveau mot (mot code), tel que 2 mots codes successifs diffèrent de α bits, où α est appelé distance de Hamming.

On montre que si la distance de Hamming est de α on peut :

- détecter toute erreur portant sur $(\alpha - 1)$ bits ;
- corriger toute erreur portant sur $(\alpha - 1)/2$ bits.

Exemple d'utilisation du code de hamming.

On veut transmettre 1001101.

- On insère des bits de contrôle aux puissances de 2 ;
10001100100
- On considère les bits à 1 de la donnée avec leur emplacement que l'on code en binaire.
11 : 1011
7 : 0111
6 : 0110
3 : 0011
- On forme un caractère de 4 bits en faisant la somme sans retenue colonne par colonne. Le code de Hamming à ajouter au message est 1001.

Le message transmis est 100(1)110(0)1(0)(1).

A la réception, on considère le message on code les indices des bits 1. Puis on contrôle la parité colonne par colonne. On doit avoir 0 partout.

Si par exemple le message reçu est 10011100101 :

11 : 1011
8 : 1000
7 : 0111
6 : 0110
3 : 0011
1 : 0001

Après le contrôle de parité colonne par colonne, on trouve 0000 : aucune erreur de transmission.

Considérons un message altéré à la réception avec une erreur : 00011100101

8 : 1000

7 : 0111

6 : 0110

3 : 0011

1 : 0001

On trouve (après la somme colonne par colonne sans retenue) 1011 qui est différent de 0000.

1011 est l'emplacement en binaire de l'erreur que l'on peut donc corriger.

Considérons un message altéré à la réception avec deux erreurs : 00011000101.

8 : 1000

7 : 0111

3 : 0011

1 : 0001

On trouve (après la somme colonne par colonne sans retenue) 1101 qui est différent de 0000.