

1. HISTORIQUE

De tout temps, l'homme a eu besoin de communiquer.

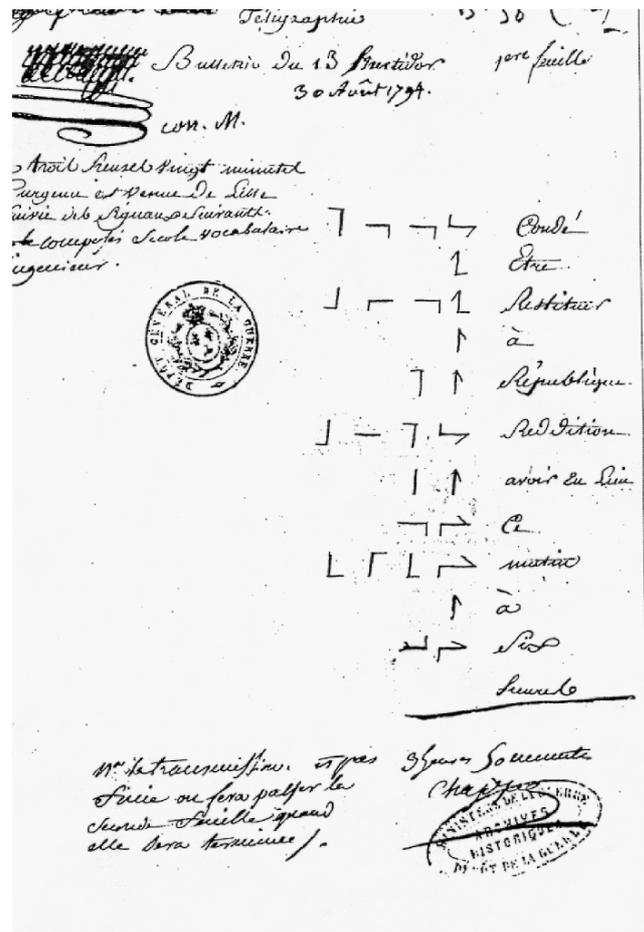
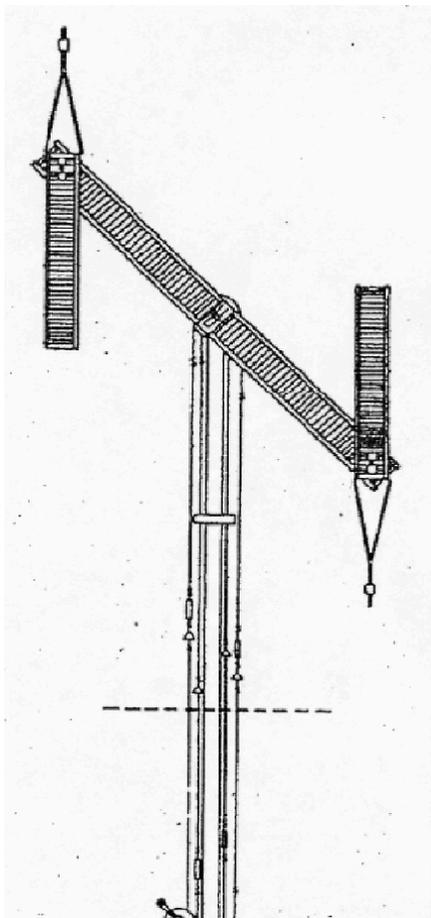
776 En France, à Roncevaux, utilisation du cor.

En Amérique, les signaux de fumée.

En Afrique et Océanie, le tam-tam.



1794 Claude Chappe construit un télégraphe entre Paris et Lille. Il est alors possible de transmettre un message sur une longue distance. Puis, grâce à l'électricité, le télégraphe se perfectionne : mise en place d'une communication sous forme de messages codés.



1832 Le MORSE naît grâce à Samuel Morse.

1876 Graham Bell invente le téléphone. La voix peut être transmise. Les vibrations provoquent une variation de l'intensité électrique qui fait vibrer la membrane de l'écouteur.

La communication à distance est désormais possible grâce à une simple paire de fils de cuivre et à une source d'énergie.

2. EVOLUTION DU XX^{ème} SIECLE

Aujourd'hui, il est possible de transmettre à n'importe quelle distance des milliers de conversations en simultané.

Le mariage de l'informatique et des télécommunications se fera dans les années 60. De cette union naîtra le terme TELEMATIQUE (rapport Simon Nora et Alain Minc en 1977).

Les réseaux de communication vont se moderniser et se fiabiliser, on assiste en France à la naissance du Minitel.

Finalement l'INTERNET va se développer, et une très grande variété de types de messages à transmettre va apparaître (texte, données, images, son, vidéo...).

Nous sommes loin du simple dialogue téléphonique, mais devant un système très complexe.

Le TELETRAITEMENT joue désormais un rôle fondamental dans notre société.

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou, encore, la propagation sur un canal radioélectrique.

Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique.

La tâche du système de transmission est d'acheminer le signal de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible.

Le schéma synoptique d'un système de transmission numérique est donné à la figure A où l'on se limite aux fonctions de base.

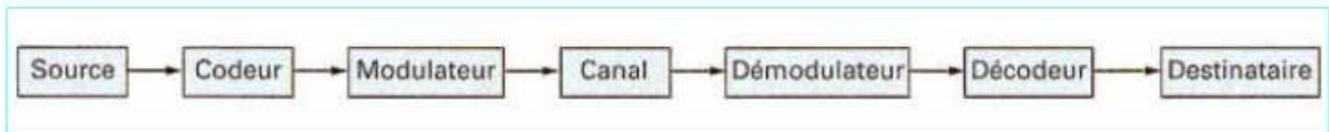


Figure A – Schéma simplifié d'un système de transmission numérique

La **source** émet un message numérique sous la forme d'une suite d'éléments binaires.

Le **codeur** englobe en général deux fonctions fondamentalement différentes. La première, appelée **codage en ligne**, associe un support physique adéquat aux éléments abstraits émis par la source. La seconde, appelée **codage correcteur d'erreurs**, consiste à introduire de la redondance dans le signal émis en vue de le protéger contre le bruit et les perturbateurs présents sur le canal de transmission.

La **modulation** a pour rôle d'adapter le spectre du signal au **canal** (milieu physique) sur lequel il sera émis.

Enfin, du côté récepteur, les fonctions de **démodulation** et de **décodage** sont les inverses respectifs des fonctions de modulation et de codage situées du côté émetteur.

3 CODAGE D'UNE INFORMATION NUMERIQUE

L'information que l'on désire transmettre doit être adaptée au mode de fonctionnement des éléments utilisés (ordinateur, automate, console de jeu...). Il faut donc la **coder**.

Exemple de l'électricité.

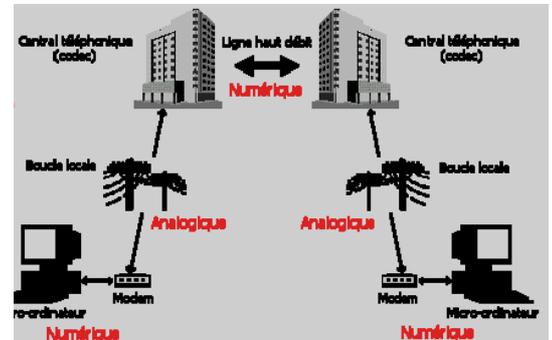
Nous connaissons les deux états d'une lampe électrique : La lampe est allumée ou éteinte.

Le langage machine utilise deux symboles : le 1 et le 0.

"1" signifie passage du courant

"0" signifie absence de courant

Il s'agit du système de numération binaire, chaque bit prend les valeurs 0 ou 1. Grâce au système binaire, on peut donc manipuler des nombres entiers, voire réels. Il existe bien sûr d'autres systèmes de numération.



Comment fera-t-on pour envoyer : TOTO EST MALADE ?

a) On remplace chaque caractère par un nombre.

Exemple : Si on envoie le code 00110111 01110011.

Il faut définir un repère. Par exemple, le nombre de bits de chaque caractère : prenons 8.

En calculant 0011 0111 0111 0011 on obtient 55 et 115.

b) Pour savoir ce que cela veut dire, il faut définir un système de codage.

En informatique, des codes ont été normalisés afin que tous les systèmes puissent se comprendre.

Code ASCII sur 7 bits (American Standard Code for Information Interchange).

Créé en 1960, le code ASCII de base représentait les caractères sur 7 bits (c'est-à-dire 128 caractères possibles, de 0 à 127).

- Les codes 0 à 31 ne sont pas des caractères. On les appelle *caractères de contrôle* car ils permettent de faire des actions telles que :

- retour à la ligne (CR)
- Bip sonore (BEL)

- Les codes 65 à 90 représentent les majuscules

- Les codes 97 à 122 représentent les minuscules

(Il suffit de modifier le 6^{ème} bit pour passer de majuscules à minuscules, c'est-à-dire ajouter 32 au code ASCII en base décimale.).

				b7	0	1	1
				b6	1	0	0
				b5	1	0	1
b4	b3	b2	b1		3	4	5
0	0	0	0	0	0	e	P
0	0	0	1	1	1	A	Q
0	0	1	0	2	2	B	R
0	0	1	1	3	3	C	S
0	1	0	0	4	4	D	T
0	1	0	1	5	5	E	U
0	1	1	0	6	6	F	V
0	1	1	1	7	7	G	W
1	0	0	0	8	8	H	X
1	0	0	1	9	9	I	Y
1	0	1	0	A	:	J	Z

E est représenté par 100 1010

Code Unicode

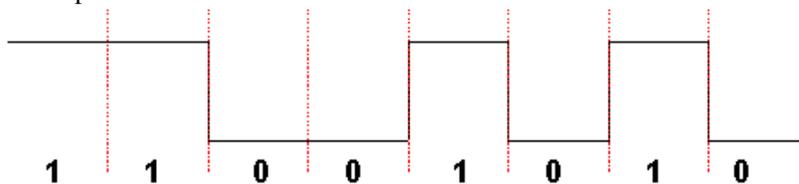
Le code *Unicode* est un système de codage des caractères sur 16 bits mis au point en 1991. Le système Unicode permet de représenter n'importe quel caractère par un code sur 16 bits, indépendamment de tout système d'exploitation ou langage de programmation.

Il regroupe ainsi la quasi-totalité des alphabets existants (arabe, arménien, cyrillique, grec, hébreu, latin, ...).

Il est compatible avec le code ASCII. L'ensemble des codes Unicode est disponible sur le site <http://www.unicode.org>.

Après codage, les informations sont donc toutes représentées sous forme de 0 ou de 1 (ou élément binaire ou bit). C'est ce que l'on appelle **la numérisation**.

On représente cette information par une suite de créneaux.



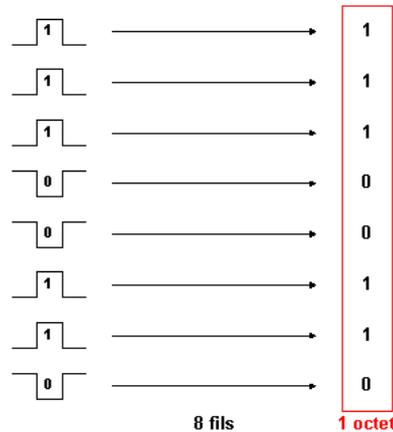
Une série de 8 bits est appelé **OCTET**

Comment fait-on pour transmettre ces suites binaires ?

Ceci peut se faire de deux manières différentes :- **Soit en parallèle**
 - **Soit en série**

En parallèle

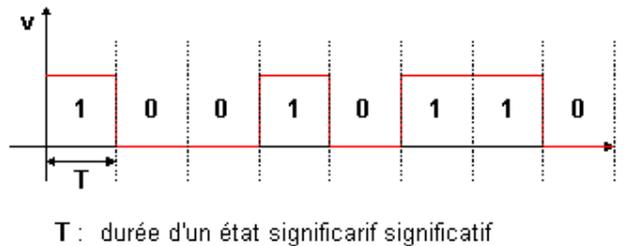
Les 8 bits d'un caractère sont envoyés simultanément sur des fils distincts



Ils arrivent donc à destination en même temps. Ce type de transmission suppose autant de fils que de bits plus des liaisons de dialogue (synchronisation). Elle est surtout utilisée pour des liaisons de courtes distances, à l'intérieur d'un ordinateur par exemple.

En série

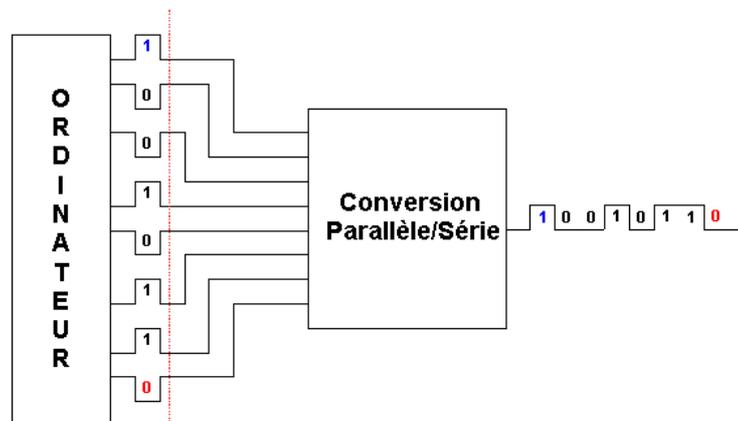
Les bits sont envoyés les uns à la suite des autres.



La succession des caractères se fait de 2 façons distinctes (synchrone et asynchrone).

Il est possible de passer d'une transmission parallèle à une transmission série :

Supposons que notre information se trouve sur un câble à 8 fils; il faut la transmettre sur un seul fil. Cette opération, appelée **sérialisation**, est réalisée par des circuits électroniques appelés registres à décalage.



La transmission se fait en commençant par le bit de poids le plus faible, et le registre est décalé de 1 bit vers la droite, au rythme d'un signal d'horloge.

A la réception, le chargement se fait de façon inverse pour restituer les informations sous forme parallèle.

4 LES MODES DE TRANSMISSIONS

En télétransmission, les équipements qui sont aux extrémités d'une liaison ne peuvent échanger des informations que s'ils utilisent les mêmes règles. On dit aussi **le même mode**.

4.1 MODES ASYNCHRONES

Les modes asynchrones sont les plus simples.

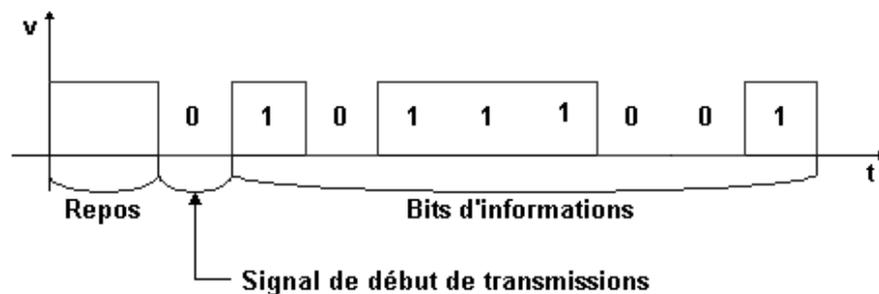
Pour celui qui est le plus utilisé, **on regroupe les bits par 8 pour former un octet ou un caractère**.

L'équipement récepteur reçoit donc 8 bits successifs dont la combinaison représente, en binaire, le caractère transmis.

Lorsqu'il n'y a pas de transmission, l'équipement d'arrivée va détecter un 0 ou un 1. Il faut donc convenir, par exemple, qu'au repos, la valeur du signal est 1 et que le passage à 0 signale l'envoi d'un octet.

Le bit à 0 qui signale le début de transmission s'appelle le **bit de START**.

Le schéma est donc le suivant :

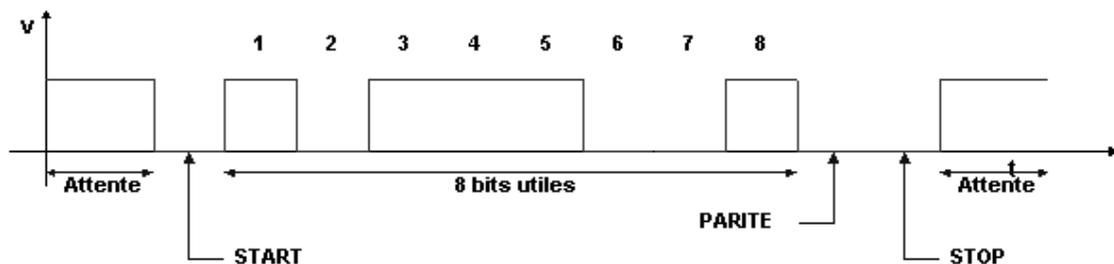


Le bit de start est un bit de service, il sert au contrôle mais ne représente pas une information utile.

A l'arrivée du bit de start, l'équipement récepteur constate qu'il va recevoir des informations mais il ne sait pas à quel rythme. **Il faut donc convenir d'une nouvelle règle, la vitesse de transmission des bits.**

Exemple : 300 bits par seconde : on envoie 1 bit tous les $1/300$ ème de seconde.

Les équipements doivent bien sûr fonctionner à la même vitesse, sinon l'émetteur enverra par exemple ses bits plus rapidement que le récepteur ne pourra les lire.



Procédure de lecture :

- 1- Détection du bit de START
- 2- Test de l'état de la ligne au milieu de chaque créneau, toutes les $1/300$ ème de seconde, ceci 8 fois de suite pour lire les 8 bits de l'octet.
- 3- Les 8 bits sont suivis en général d'un **bit de parité**, puis d'un **bit de stop**.

Le bit de parité permet de détecter une erreur sur les bits d'information.

Le bit de stop permet de créer un intervalle de temps minimum avant d'envoyer le caractère suivant.

Dans le mode asynchrone, les caractères arrivent n'importe quand.

La synchronisation, c'est à dire le calage temporel du récepteur pour lire les bits qui arrivent, est déclenchée par le bit de start et maintenue jusqu'à la lecture du bit de stop.

Après ce bit, il y a désynchronisation jusqu'à l'arrivée du caractère suivant.

4.2 MODES SYNCHRONES

Dans le mode synchrone, **même en l'absence de transmission, le récepteur est toujours calé sur l'émetteur en recevant en permanence l'information d'horloge.**

Rappel : en mode asynchrone, entre 2 caractères, la ligne reste en permanence à 1 ou à 0.

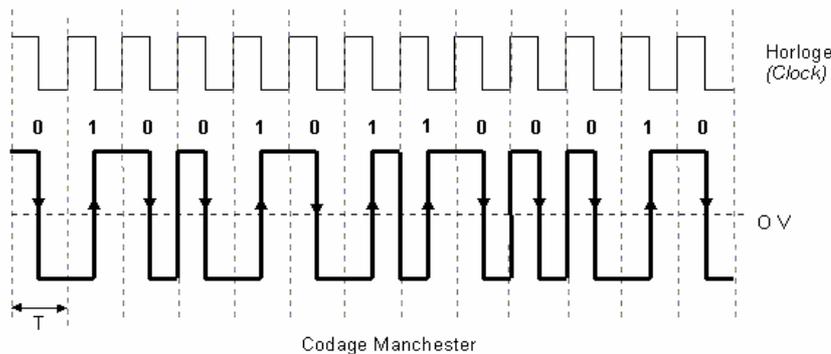
Il s'agit donc de transmettre les tops d'horloge avant de transmettre les bits d'information.

On dispose de deux moyens pour y parvenir :

- *Transporter* le signal d'horloge sur un support séparé reliant l'émetteur et le récepteur. Cette technique est utilisée sur des courtes distances.
- *Reconstitué le signal d'horloge à partir du signal reçu.* Cette deuxième alternative, est très utilisée pour résoudre le problème de synchronisation lorsque l'émetteur et le récepteur sont séparés par de longues distances.

Le **codage Manchester** fait partir de cette seconde catégorie.

- Chacun des fronts donne le top d'horloge
- Le sens du front (montant ou descendant) donne la valeur du bit.



Les tops d'horloge sont donc toujours présents même si les bits d'information restent en permanence à 0 ou à 1.

Signalons qu'il existe 2 modes synchrones :

En mode caractère, l'information utile est transmise sous la forme **d'un nombre entier d'octets.**

En mode bit, l'information est transmise sous forme d'un **nombre quelconque de bits** ; on parle de trames de bits.

Le synchrone et l'asynchrone ont-ils des avantages différents ?

Le mode asynchrone est simple et peu coûteux mais il utilise mal la liaison car il y a beaucoup de bits de service par rapport au nombre de bits utiles.

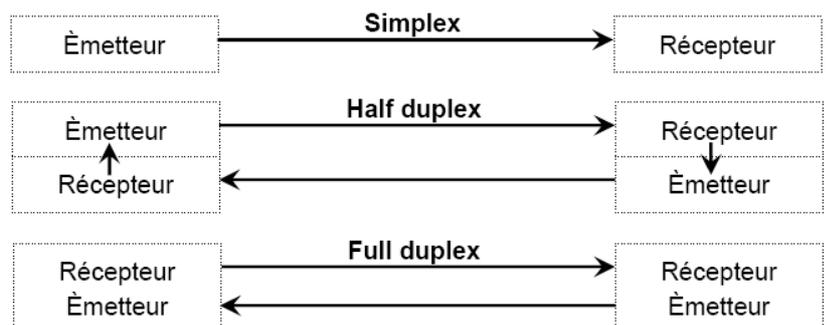
Le mode synchrone est plus complexe et plus coûteux mais il utilise mieux la liaison; il est pratiqué pour des transmissions de grande vitesse.

4.3 SENS DES LIAISONS

Pour transmission entre deux points, la plupart du temps, il faut traiter un dialogue et non un monologue. Il faut donc une convention pour fixer le sens de la transmission.

On trouvera 3 cas :

- Dans un seul sens : **liaison simplex.**
- Dans les 2 sens non simultanément : **liaison half duplex.**
- Simultanément dans les deux sens : **liaison full duplex ou duplex intégral.**



5 LES TECHNIQUES DE TRANSMISSION

Cette partie est consacrée aux techniques de modulation et de multiplexage couramment utilisées.

5.1 LA MODULATION

L'information étant codée (ex code ASCII) puis le mode de synchronisation étant défini (mode synchrone ou asynchrone), il faut définir le mode de transmission des signaux sur la liaison (câble, espace, fibre optique...).

L'objectif est d'exploiter au mieux le support et sa bande passante.

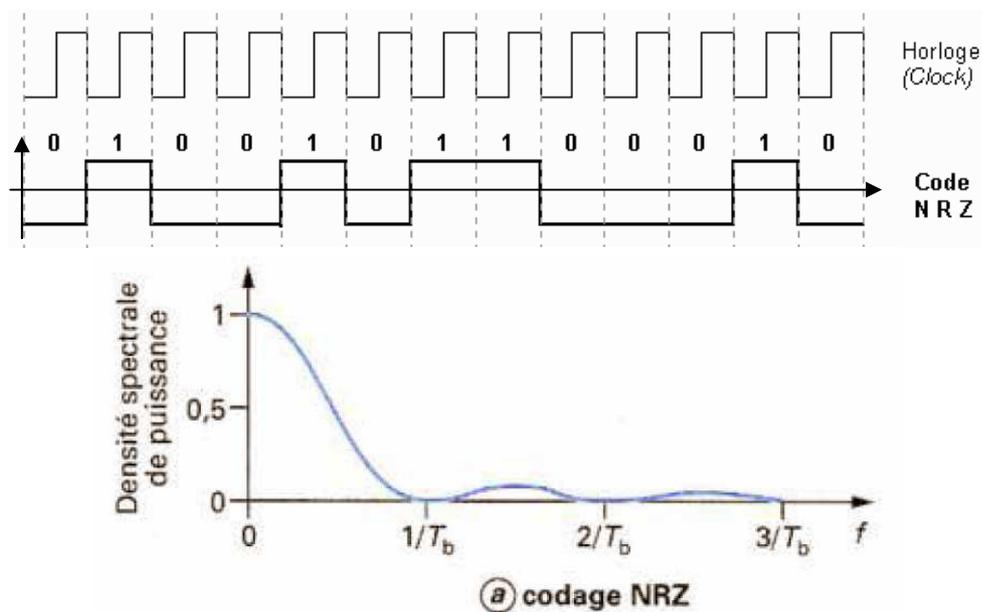
La méthode la plus simple quand on dispose d'un support matériel (fil ou fibre) consiste à émettre des signaux (courants ou tensions) qui reflètent les bits des caractères à émettre. **Cette méthode est appelée bande de base.**

Les signaux sont émis en ligne sous forme d'impulsions électriques carrées.

Il existe plusieurs codes pour transmettre en bande de base. On peut en citer deux.

Le code NRZ (*Non Return to Zero, le signal ne comportant pas de transition "retour vers zéro"*)

Dans ce code, on utilise des impulsions polaires. A chaque état d'un bit "1" ou "0", on associe une tension ou un courant positif ou négatif.



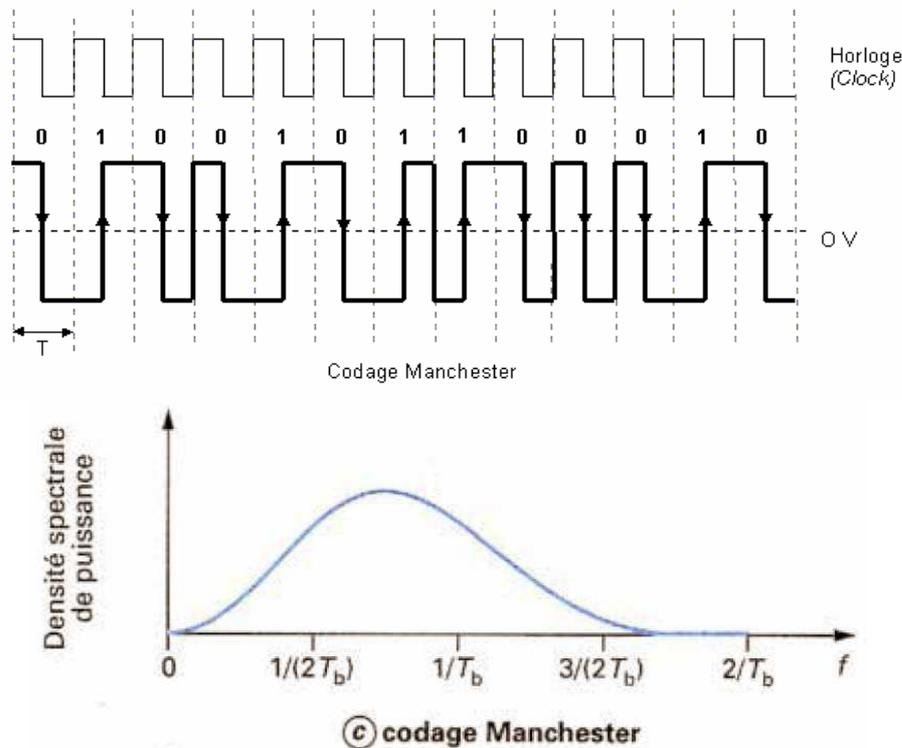
Le spectre de ce codage est essentiellement concentré à $f < 1/T_b$. Il est étroit.

L'inconvénient majeure est de ne pas retrouver l'information d'horloge coté réception pour des suites de 0 ou 1. Il faut donc prévoir un moyen de synchronisation.

D'autre part, la valeur moyenne du signal transporté est non nulle, d'où la composante continue du spectre. Cette dernière est difficilement transmise par les composants d'un réseau.

Codage Manchester (ou codage Bi-phase) :

Le codage Manchester est obtenu par le **mélange** (opération logique OU-exclusif) d'un signal **horloge** et d'un signal **NRZ**. De cette manière on peut, par exemple, matérialiser un "1" logique par une transition **montante** en milieu de période bit (T) et le "0" logique par une transition descendante.

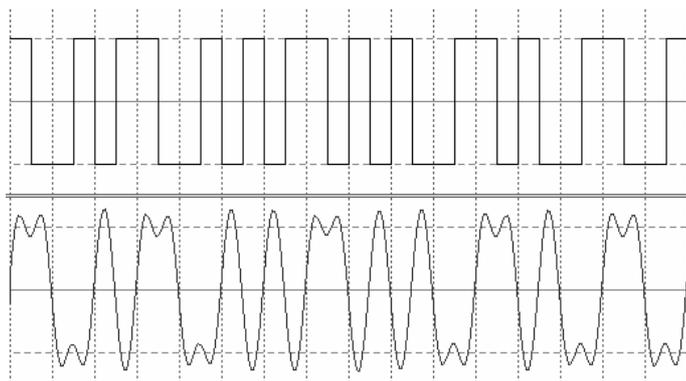


Le spectre de ce codage est plus large à $f < 1,5/T_b$.

Par exemple pour un débit de 2400 bits/s il faudrait une bande passante de $1,5 \times 2400 \text{ Hz} = 3600 \text{ Hz}$.

Il permet de transmettre l'information d'horloge coté réception par la position des fronts du signal reçu.

Toutes les transmissions peuvent donc circuler en bande de base directement sur les lignes. La transmission en bande de base pose un problème. Si c'est la solution la moins coûteuse, il n'en reste pas moins que la dégradation des signaux est rapide et importante, suivant la distance.



La courbe ci-dessus montre l'allure du signal Manchester après passage dans une liaison ayant une fréquence de coupure de $1,6 \times 1/T_b$.

Pour des liaisons longue distance, les signaux ne sont pas transmis en bande de base; ils sont transformés en signaux sinusoïdaux. Un signal sinusoïdal à spectre étroit, est plus facilement transportable sur une ligne. Il se déforme beaucoup moins que des signaux carrés de spectres plus encombrants.

On module le signal numérique en signal sinusoïdal pour le transporter facilement.

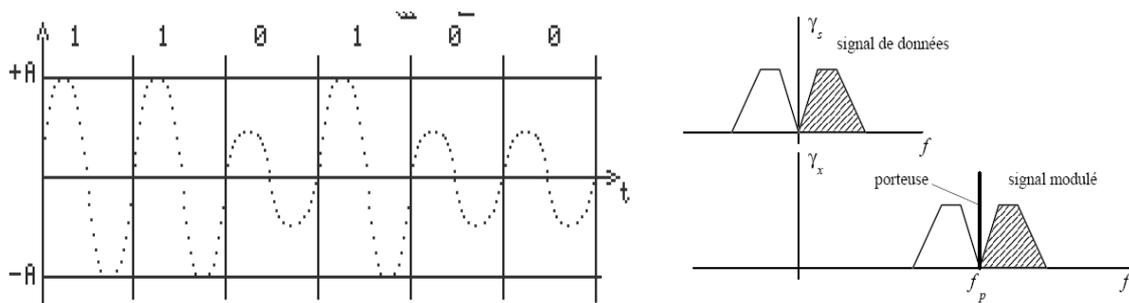
Un signal sinusoïdal $v(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ est caractérisé par son amplitude A , sa fréquence $\omega/2\pi$ et sa phase φ .

La modulation consiste à faire varier dans le temps l'une des trois caractéristiques du signal sinusoïdal, il y a donc 3 types de modulation :

- modulation d'amplitude
- modulation de fréquence
- modulation de phase

Modulation d'amplitude.

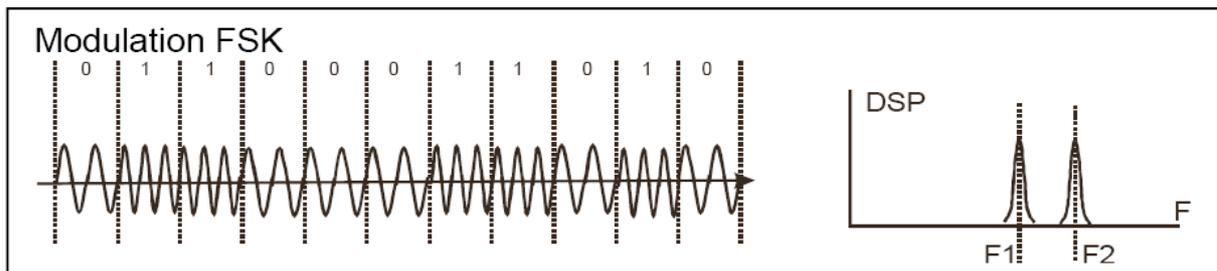
La distinction entre le 0 et le 1 est obtenue par une différence d'amplitude du signal.



La modulation d'amplitude est très simple, mais est très sensible aux parasites et aux imperfections des lignes.

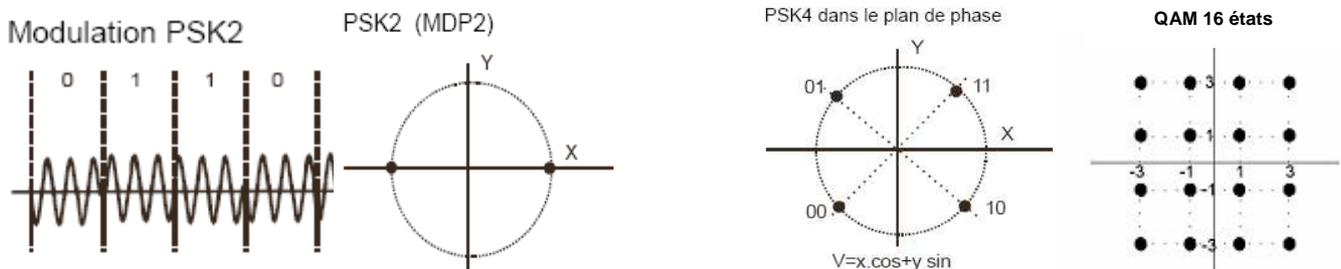
Modulation de fréquence (plutôt modulation par saut de fréquence ou FSK frequency shift keying).

L'émetteur change la fréquence d'envoi des signaux suivant que l'élément binaire à émettre est 0 ou 1.



Modulation de phase (plutôt modulation par saut de phase ou PSK Phase-shift keying).

Dans la modulation de phase à 2 états (PSK2), la distinction entre 0 et 1 est effectuée par un signal qui commence à des endroits différents de la sinusoïde.



Si on choisit 4 états de phase (PSK4), chaque état transporte donc l'information d'un mot de 2 bits. Il est représentable par un point parmi 4 dans le plan complexe avec codage Gray. Les 4 états de phase peuvent être $k\pi/2$ ($k=0, 1, 2, 3$).

On trouve des modulation PSK allant jusqu'à 8, au delà le taux d'erreur est trop élevé.

En combinant modulation de phase en quadrature, et modulation d'amplitude (modulation QAM) on augmente le débit de la liaison. En France, la TNT utilise le 64QAM.

5.2 LE MULTIPLEXAGE

Multiplexer consiste à partager le support de données entre plusieurs utilisateurs.

Le problème consiste donc à relier N terminaux entre eux, sans pour autant construire N liaisons afin de réaliser des économies.

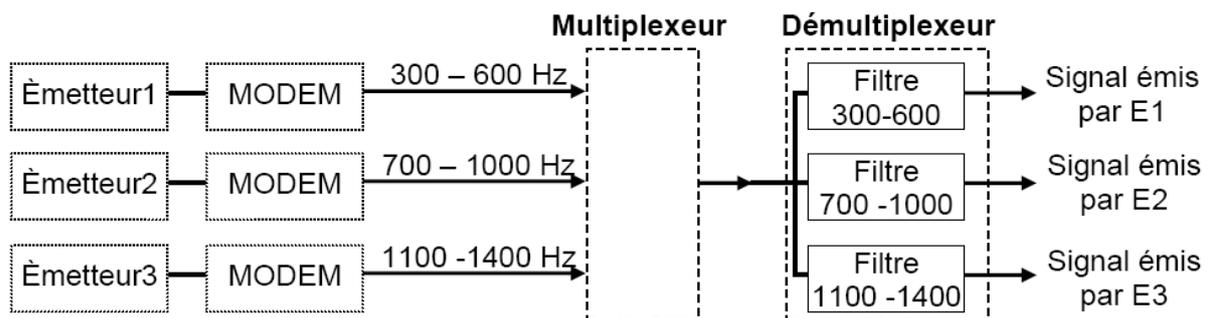
On distingue 2 types de multiplexage

Le multiplexage en fréquence (FDM Frequency Division Multiplexing)

Le multiplexage temporel (TDM Temporel Division Multiplexing)

Le multiplexage FDM

Une ligne de données a une bande passante de 300 à 1400 Hz. Le principe est de partager cette bande entre les différents terminaux. **Chacun utilisera une fréquence différente.**



Pour éviter le mélange, on assure 100 Hz de bande de garde. Cette technique est simple mais présente l'inconvénient d'être coûteuse, peu efficace et limitée en vitesse.

C'est pourquoi elle est utilisée pour de courtes distances. Le découpage des fréquences se fait par des filtres, plus précisément des filtres passe-bande qui ont pour but de découper le spectre du signal de chaque côté.

Le multiplexage TDM

Le second type de multiplexage est le multiplexage temporel ou TDM.

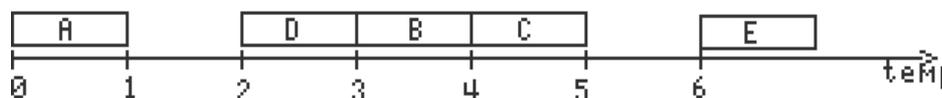
Il partage dans le temps l'utilisation d'une ligne. Les fréquences sont identiques et **chaque utilisateur émettra à son tour.**

C'est équivalent à un commutateur qui, réglé par une horloge connecterait l'utilisateur à la ligne.

Comment la synchronisation entre l'équipement et le multiplexeur s'effectue-t-elle ?

Le multiplexage temporel va être synchrone ou asynchrone. C'est la même notion que les modes synchrone et asynchrone étudiés sur les transmissions de données.

Soient 3 équipements : E1, E2 et E3. En fait, des quanta de temps égaux sont alloués à chaque équipement.



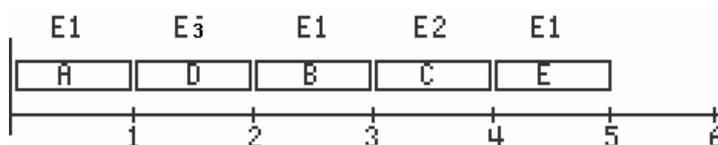
On constate que même si un équipement n'a rien à transmettre, son quantum de temps lui reste acquis. On peut dire qu'il y a synchronisation entre les équipements et le multiplexeur. **Ce type de multiplexage est dit synchrone.**

Le multiplexeur synchrone travaille comme un commutateur piloté par une horloge. On parlera de **période de scrutation.**

La période de scrutation correspond au temps de chaque quantum multiplié par le nombre d'équipements.

Dans le **multiplexage temporel asynchrone ou statistique**, les quantum de temps sont également alloués mais un émetteur n'ayant rien à transmettre laisse son tour au suivant.

Il n'y a pas de perte de temps mais des bits supplémentaires doivent préciser à qui est alloué chacun des quantum.



6 LES ERREURS DE TRANSMISSION

Entre les deux extrémités d'une liaison, la présence des imperfections du support de transmission (affaiblissement, déphasage), et la présence de bruit électromagnétique, perturbent de façon aléatoire les données transmises.

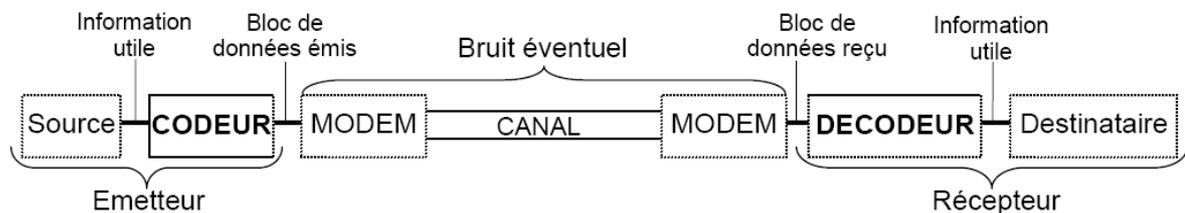
Ces perturbations se traduisent au niveau de l'information reçue, par des modifications : soit des disparitions, soit des adjonctions, soit des inversions ('0 en 1' ou '1 en 0').

L'objet de cette partie, est d'aborder les méthodes couramment utilisées dans les réseaux informatiques, pour protéger les données émises contre les erreurs introduites par le canal de transmission.

La vérification systématique par la répétition ou par l'écho, la répétition sur demande et le contrôle de parité (somme paire ou impaire des bits des octets) constituent des moyens classiques utilisés en détection d'erreur.

Des solutions plus fiables en transmission ont permis d'alléger les processus de détection d'erreur. Aujourd'hui, les aspects de sécurité soulèvent les points d'authentification, de non répudiation, de non intrusion, d'intégrité, de chiffrement et de sécurité des paiements.

La technique adoptée dans la plupart des systèmes de détection d'erreurs, consiste à ajouter des *bits supplémentaires (dit redondants)* à chaque bloc de données avant de le transmettre sur le support de transmission.



Ces techniques utilisent un *codeur* à l'émission et un *décodeur* à la réception, comme le montre la figure ci-dessus.

Il faut distinguer deux cas, suivant les *possibilités du décodeur* :

- Lorsque le *décodeur corrige lui même* automatiquement certaines erreurs, on dit que la stratégie est une correction d'erreurs directe.
- Lorsque le décodeur *ne peut que détecter des erreurs*, il est nécessaire de retransmettre le bloc de données pour réaliser la correction, on dit que la stratégie est une *correction par retransmission* et on la note ARQ (Automatique Repeat reQuest, procédure de retransmission automatique).

Contrôle de parité

Il existe *deux types de contrôle de parité* (pair et impair) et il est indispensable que l'émetteur et le récepteur s'entendent sur le type à utiliser pour l'ensemble de la transmission.

Parité paire : Lorsque le nombre de '1' dans les données envoyées est impaire, le bit de parité (bit de contrôle) est placé à '1' de manière à ce que le nombre total de '1' soit pair y compris le bit de parité. Dans le cas contraire, le bit de parité est placé à '0'.



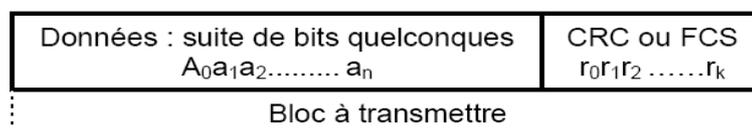
Parité impaire : Elle correspond au système inverse.

Quelle que soit la parité choisie, si un bit est modifié au cours de la transmission, les calculs de parité effectués par l'émetteur et par le récepteur différeront.

Cette méthode est peu performante, le contrôle fonctionne correctement seulement si le nombre de bits modifiés est impair.

Contrôle par redondance cyclique

Pour vérifier la précision d'une transmission, les réseaux recourent en général à une méthode de détection d'erreurs appelée CRC (Cyclic Redundancy Check ou Control de Redondance Cyclique). Cette méthode permet de détecter plus d'erreurs que le contrôle de parité. Elle nécessite l'ajout de bits redondants r_0 à r_k , calculés à partir des données a_0 à a_n . Les polynômes CRC ou FCS obéissent à des normes.



Correction d'erreur

La détection d'erreur suivie d'une retransmission est la solution la plus utilisée dans les réseaux informatiques. Des mécanismes *d'accusés de réception* (ACKnowledge acquittements) permettent de confirmer à l'émetteur que les données transmises sont bien arrivées sans erreur. Ces accusées de réceptions sont généralement des blocs de données spéciales. Divers types de politiques d'acquiescement et de retransmission peuvent être adaptés :

Retransmission avec arrêt et attente

L'émetteur transmet le bloc de données (composé de bits de données + FCS) et attend un accusé de réception positif ou négatif :

- Si l'accusé de réception est positif (*ACK*, ACKnowledge), *il émet le bloc suivant*, puis il attend le prochain accusé de réception.
- Si l'accusé de réception est négatif (*NACK*, Not ACKnowledge), *il réémet le bloc à nouveau*.

Cette stratégie est mise en oeuvre sur un circuit full duplex ou half duplex.

Retransmission continue

Avec cette méthode, l'émetteur envoie une série de blocs successifs contenant des numéros de séquence sans attendre d'accusé de réception entre deux blocs, il ne s'interrompt que lorsqu'il reçoit un accusé de réception négatif (NACK). Dans ce cas la l'émetteur *retransmet alors le bloc erroné ainsi que les blocs suivants*. Par exemple, si l'émetteur envoie 10 blocs numérotés de 1 à 10, et que le bloc 7 est altéré, le récepteur envoie un accusé de réception négatif pour ce bloc à l'émetteur, qui lui envoie les blocs 7, 8, 9 et 10.

Retransmission à réception sélective

Elle suit le même principe que celui de la transmission continue, sauf dans ce cas lors d'un accusé de réception négatif, seul le bloc erroné est retransmis. Cette stratégie est mise en oeuvre seulement sur une liaison full duplex.

Remarque

Quel que soit le type de retransmission, si l'émetteur ne reçoit pas d'accusé de réception après un délai donné, le bloc non accusé est réémis automatiquement, c'est ce qu'on appelle *retransmission après dépassement de délai d'attente*.

Notion de taux d'erreurs

Dans la pratique, on mesure la qualité d'une liaison numérique (qualité de transmission) par le taux d'erreur appelée BER (Bit Error Rate), il est donné par le nombre de bits erronés rapporté au nombre total de bits transmis.

$$T_e = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre de bits transmis}}$$

Le taux d'erreurs varie en pratique de 10^{-4} (ligne téléphonique) à 10^{-9} (réseaux locaux).

Le taux d'erreurs est devenu très satisfaisant descendant souvent sous la barre des 10^{-9} et cela provient de techniques de codage plus performantes et de l'utilisation de support de transmission de très bonnes qualités comme la fibre optique.