

Chapitre 2 : La couche physique

Le rôle de la couche physique est de transformer une suite de bits en signaux (et inversement) pour les adapter au canal de communication et les transmettre d'une machine à une autre. Les bits transformés représentent des informations numérisées (codées) tel que le code ASCII pour les textes, avi pour le multimédia, ...etc. La couche physique détermine la façon selon laquelle les bits sont transportés sur le support physique. Elle permet d'introduire les bits 0 et 1 sur le support sous une forme spécifique, reconnaissable par le récepteur. Plusieurs composants sont utilisés dans cette couche, comme les modems, multiplexeurs, concentrateurs, etc. Ce chapitre étudie les supports de transmission et leurs caractéristiques ainsi que les méthodes utilisées pour transmettre l'information sur ces supports.

I. Principe de la transmission

1. Nature de l'information à transmettre (analogique / numérique)

Les informations qui transitent sur les réseaux informatiques existent sous des formes diverses (textes, sons, images fixes ou animées, vidéo, etc....). Ces informations peuvent être réparties en 2 grandes catégories :

- Les données discrètes ou numérique : l'information correspond à un assemblage d'une suite d'éléments indépendants les uns des autres (c'est une suite discontinue de valeurs) et dénombrable (c'est un ensemble fini). Par exemple : un texte, qui est un ensemble de lettres (ou de symboles) qui forment des mots, une image, qui est un ensemble de pixels.

- Les données continues ou analogique : résultent de la variation continue d'un phénomène physique. Exemple le son : le son se propage dans l'air sous forme d'une onde de pression, transmise par le mouvement des molécules. En gros c'est une déformation de l'air due à un phénomène physique.

Pour pouvoir transporter ces informations à travers les réseaux de télécommunication, chaque information doit être substituée par une suite d'éléments binaires (une suite de 0 et de 1). Cette opération porte le nom de :

- Codage de l'information pour les informations discrètes (numériques).
- Numérisation de l'information pour les informations analogiques.

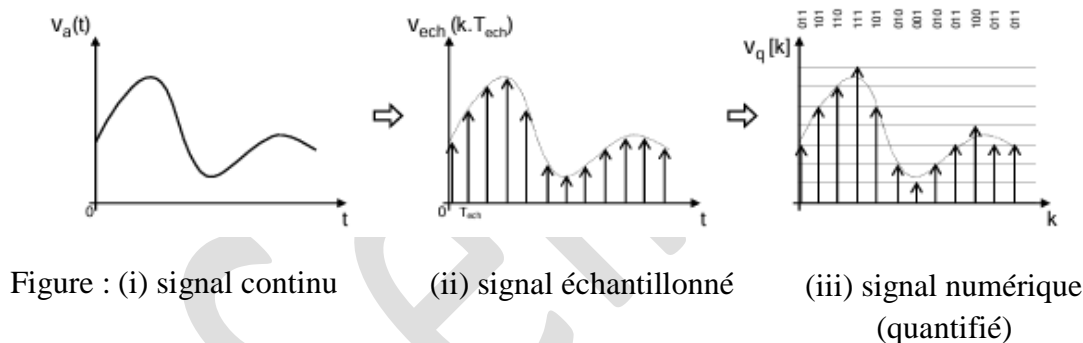
Après l'étape de codage/numérisation intervient l'étape transmission : Comment envoyer les suites binaires des caractères vers l'utilisateur final de ces informations ?

2. Conversion analogique numérique (Principe, intérêts)

Un convertisseur analogique – numérique (CAN) est un dispositif électronique permettant la conversion d'un signal analogique en un signal numérique. Cette première définition pour être complète en appelle deux autres, celles des signaux analogiques et numériques :

- Signal analogique : signal continu en temps et en amplitude.
- Signal numérique : signal échantillonné et quantifié, discret en temps et en amplitude.

Conceptuellement, la conversion analogique – numérique peut être divisée en trois étapes : l'échantillonnage temporel, la quantification et le codage. La figure ci-dessous présente successivement ces trois étapes pour un CAN dont la sortie du signal numérique est sur 3 bits :



Un signal analogique, $V_a(t)$ continu en temps et en amplitude, est échantillonné à une période d'échantillonnage constante T_{ech} . On obtient alors un signal échantillonné $V_{ech}(k, T_{ech})$ discret en temps et continu en amplitude. Ce dernier est ensuite quantifié, on obtient alors un signal numérique $V_q[k]$ discret en temps et en amplitude. La quantification est liée à la résolution du CAN (son nombre de bits) ; dans l'exemple précédent $V_q[k]$ peut prendre huit amplitudes différentes (soit 2^3 , 3 étant le nombre de bits du CAN). La figure (iii) présente également le code numérique sur trois bits (en code binaire naturel) associé à $V_q[k]$ en fonction du temps.

3. Caractéristique d'une voie de transmission

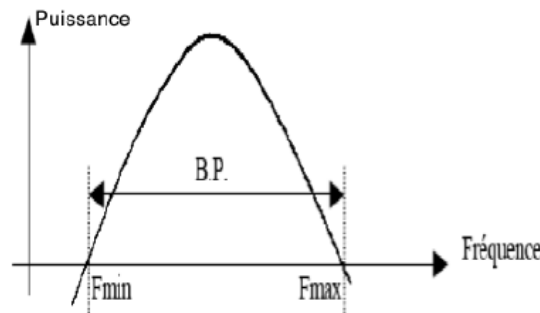
Certaines caractéristiques physiques des supports perturbent la transmission. La connaissance de ces caractéristiques (la bande passante, la sensibilité aux bruits, les limites des débits possibles) est donc nécessaire pour fabriquer de bons signaux, c'est-à-dire les mieux adaptés aux supports utilisés.

3.1 La bande passante

La bande passante d'une voie est la plage de fréquence sur laquelle la voie est capable de transmettre des signaux sans que leur affaiblissement soit trop important. Elle est définie par :

$$W = f_{max} - f_{min}$$

Où f_{min} est la fréquence transmise la plus basse et f_{max} la plus haute.



Lorsqu'on parle de la bande passante, on indique une largeur d'intervalle sans préciser les bornes de cet intervalle. Par exemple, la largeur de bande de la ligne téléphonique est 3100Hz.

3.2 Rapidité de modulation

La rapidité de modulation R , exprimée en *bauds*, indique le nombre de symboles transmis par unité de temps. Si Δ représente la durée (en secondes) de l'intervalle de temps séparant deux valeurs significatives du signal, alors :

$$R = \frac{1}{\Delta} \text{bauds}$$

Pour un support de transmission, la rapidité de modulation maximale dépend de sa bande passante (critère de Nyquist). La rapidité de modulation maximale R_{max} est égale au double de la fréquence la plus élevée disponible sur le support :

$$R_{max} = 2f_{max}$$

3.3 Taux d'erreur

Il représente la probabilité de perte ou d'altération d'une information (1 bit). On peut la mesurer en calculant pendant un temps significatif le rapport du nombre de bits erronés sur le nombre de bits émis.

3.4 Débit binaire

Le débit binaire D est le nombre de bit transmis par unité de temps. Par exemple 512 Kbits/s ou 1 Gigabit/s. La relation liant la rapidité de modulation au débit binaire est exprimée par la formule :

$$D = R \rightarrow \log_2(V)$$

Où V désigne la *valence* du signal représentant le nombre des états significatifs que peut prendre le signal.

Une *valence* de valeur V permet le transport de $P(\text{bits}) = \log_2(V)$ à chaque baud. Par exemple, pour des modulations simples (des signaux de *valence* 2) chaque intervalle Δ transporte 1 bit. Les valeurs numériques du débit binaire et de la rapidité de modulation sont alors égales $R = (D)$.

Exercice : Si la durée d'un bit est 20ms, quel est le débit binaire ?

3.5 Délai de propagation T_p

C'est le temps nécessaire à un signal pour parcourir un support d'un point à un autre. Ce temps dépend de la nature du support, de la distance, de la fréquence du signal, etc.

4. Supports physiques de transmission

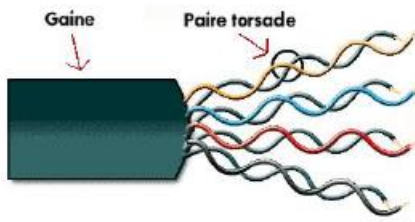
Les supports de transmission sont nombreux et se divisent en deux familles : les supports à guide physique et les supports sans guide physique. Les supports à guide physique, comme les paires torsadées et les câbles coaxiaux, sont les plus anciens, les plus largement utilisés et servent à transmettre des courants électriques. Les supports de verre ou de plastique, comme les fibres optiques, transmettent de la lumière, tandis que les supports sans guide physique des communications sans fil transmettent des ondes électromagnétiques et sont en plein essor.

4.1 Supports à guide physique

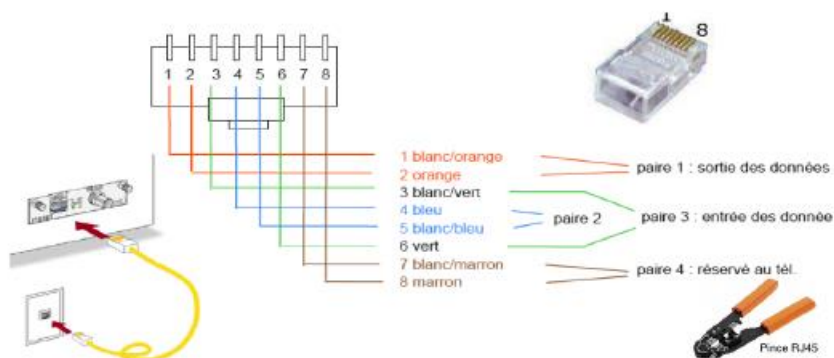
C'est des supports qui utilisent les câbles de différents types pour transmettre l'information.

a) Paires torsadées

La paire torsadée ou enroulée (twisted) est constituée de deux conducteurs identiques torsadés. L'enroulement réduit les conséquences des parasites provenant de l'environnement. L'utilisation la plus courante de la paire torsadée est le raccordement des usagers au central téléphonique (norme RJ11 : Registered Jack). Les réseaux locaux informatiques, où les distances se limitent à quelques kilomètres, utilisent la norme RJ45 utilisant des câbles contenant 4 paires torsadées.



Le raccordement des câbles RJ45 se fait à travers les connecteurs RJ45 permettant de connecter les fils selon le schéma suivant :



La fabrication manuelle des câbles RJ45 se fait par un pince spéciale appelé "pince RJ45".

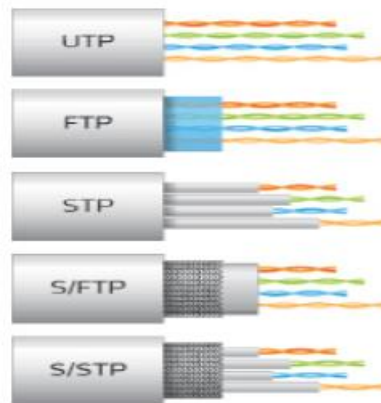
Le principal inconvénient des paires torsadées est l'affaiblissement des courants transmis. Elles utilisent souvent, à intervalles réguliers, des éléments appelés répéteurs qui régénèrent les signaux transmis.

Pour les réseaux locaux d'entreprise, la paire torsadée peut suffire. Ses avantages sont nombreux : technique maîtrisée, facilité de connexion et d'ajout de nouveaux équipements, faible coût ainsi qu'elle peut être utilisée en point à point ou en diffusion.

Il existe, généralement trois types de câbles :

- UTP (Unshielded Twisted Pairs) : câble à paires torsadées non blindées et non écrantées. Parfois utilisé pour la téléphonie, pas recommandé pour l'informatique.
- FTP (Foiled Twisted Pairs) : paires torsadées entourées dans leur ensemble d'une feuille d'aluminium (écran). C'est le type standard.
- STP (Shielded Twisted Pairs) : paires torsadées entourées chacune par une feuille d'aluminium.

- SFTP (Shielded Foiled Twisted Pairs) et SSTP (Shielded Shielded Twisted Pairs) : câbles FTP ou STP blindés. A utiliser dans les locaux avec fortes perturbations électromagnétiques.

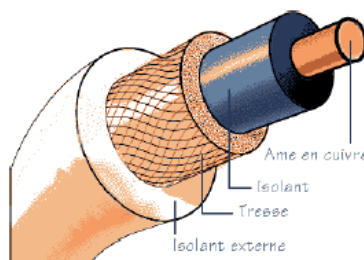


Les câbles à paires torsadées sont normalisés en catégories de Cat1 à Cat7, Les plus utilisées actuellement sont :

- Catégorie 3 : Bande passante 16MHz, utilisée pour la téléphonie.
- Catégorie 5 : Bande passante 100MHz, Débit 100MB/s sur 100m utilisée pour la téléphonie et les réseaux.
- Catégorie 6 : Bande passante 250MHz, Débit GB/s sur 100m utilisée pour les réseaux.
- Catégorie 6a : Bande passante 500MHz, Débit 10GB/s sur 100m.
- Catégorie 7 : Bande passante 600Mhz, Débit 10GB/s.

b) Câble coaxial

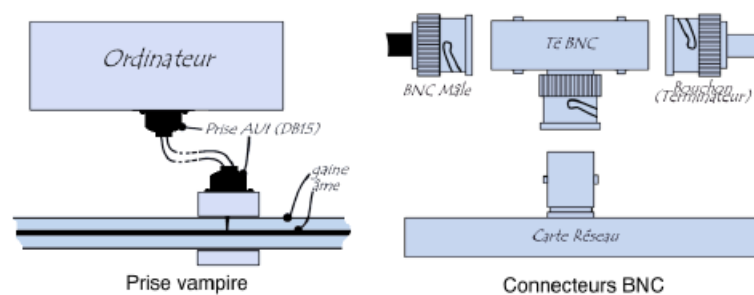
Le câble coaxial est formé de deux conducteurs cylindriques de même axe séparés par un isolant, le tout étant protégé par une gaine plastique.



Il existe deux types de câble coaxial :

- Le câble 75Ω , dit "large bande" (broadband) utilisé pour la transmission analogique : c'est le câble de télévision !
- Le câble 50Ω , dit "bande de base" (baseband) généralement utilisé pour transmettre des signaux numériques. Il permet une bande passante de quelques centaines de MHz et des débits allant jusqu'à 2Gbit/s.

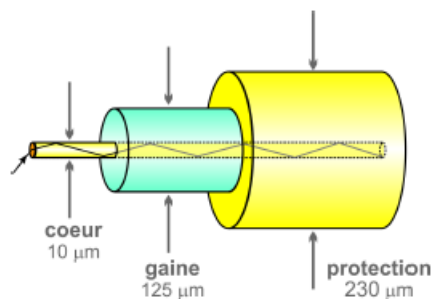
Le câble coaxial est raccordé par des prises vampire pour les gros câbles et les fiches BNC (British Naval Connector) pour les câbles fins.



Le câble coaxial est d'une qualité de transmission et débits meilleures que les paires torsadées et peut être utilisé en point à point ou en diffusion. Cependant, il est un peu plus cher.

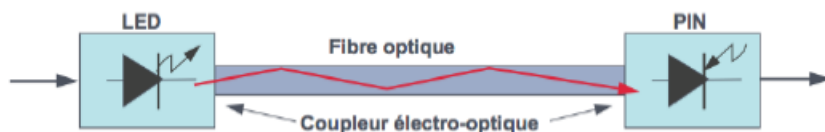
c) Fibre optique

Une fibre optique est constituée d'un fil de verre très fin. Elle comprend un cœur, dans lequel se propage la lumière émise par une diode électroluminescente ou une source laser, et une gaine optique dont l'indice de réfraction garantit que le signal lumineux reste dans la fibre.



Un système de transmission par fibre optique met en œuvre :

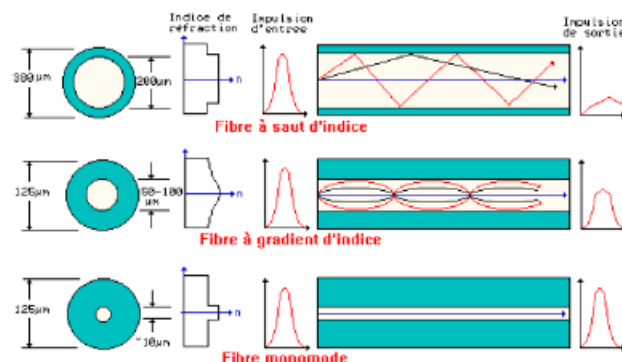
- Un émetteur de lumière (transmetteur), constitué d'une diode électroluminescente (LED, Light Emitting Diode) ou d'une diode LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), qui transforme les impulsions électriques en impulsions lumineuses ;
- Un récepteur de lumière, constitué d'une photodiode de type PIN (Positive Intrinsic Negative) qui traduit les impulsions lumineuses en signaux électriques ;
- Une fibre optique.



La fibre étant un système de transmission unidirectionnel, une liaison optique nécessite l'utilisation de 2 fibres. Il existe trois types de fibre optique.

- Fibre multimode à saut d'indice : le cœur d'indice de réfraction n_1 est entouré d'une gaine d'indice n_2 . La variation d'indice entre le cœur et la gaine est brutale (saut d'indice). La propagation s'y fait par réflexion totale à l'interface cœur/gaine. Le diamètre du cœur est important ce qui lui permet d'admettre plusieurs rayons qui se propagent sur des chemins différents ou modes de propagation. La portée des rayons étant de 10 km.
- Fibre multimode à gradient d'indice : dans ce type, l'indice du cœur décroît de façon continue, depuis le centre du cœur jusqu'à l'interface cœur/gaine suivant une loi parabolique. Tous les rayons sont focalisés au centre de la fibre, ils ont une trajectoire proche de la sinusoïde. La dispersion étant réduite ce qui autorise des portées d'environ 50 km.
- Fibre monomode : le diamètre du cœur est réduit à $8\text{ }\mu\text{m}$. Cette réduction, peut être telle que, pour une longueur d'onde donnée, la fibre n'admette plus qu'un seul rayon.

La fibre est alors dite monomode et la distance franchissable est de l'ordre de 100 km.



Le raccordement de la fibre optique utilise des connecteurs de types SC (Subscriber connector), ST (Straight Tip), FC (Fiber Connector), LC (Lucent Connector).



Malgré que la fibre optique ne permet que les connexions en point à point, ses avantages sont nombreux :

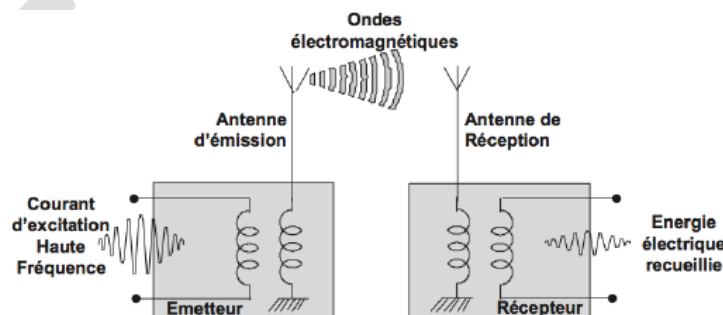
- Débits allant jusqu'à 50 GBit/s (débit théorique 50 TBit/s),
- Transmission simultanée de très nombreux canaux de télévision, de téléphone, ...
- Insensible aux parasites électromagnétiques,
- Diamètre extérieure est de l'ordre de 0,1 mm,
- Poids de quelques grammes au kilomètre.
- Difficile à pirater.

4.2 Supports sans guide physique

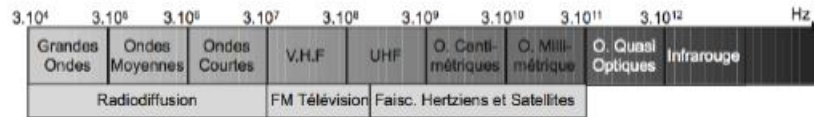
a) Ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques se propagent dans l'atmosphère. L'absence de support matériel apporte une certaine souplesse et convient aux applications comme la téléphonie ou les télécommunications mobiles, sans nécessiter la pose coûteuse de câbles.

Une antenne d'émission rayonne une énergie (onde électromagnétique). Cette énergie électromagnétique recueillie par un autre conducteur distant ou antenne de réception est transformée en un courant électrique similaire à celui d'excitation de l'antenne d'émission.



Chaque type de liaison ou d'application utilise des bandes de fréquences différentes. L'espace de fréquences utilisables est limité et géré par des organismes nationaux et internationaux. La figure suivante décrit l'utilisation des différentes plages de fréquences.



Les hautes fréquences (faisceaux hertziens) sont utilisées pour franchir de grandes distances tandis que les basses (ondes radioélectriques) pour atteindre des récepteurs géographiquement dispersés.

b) Faisceaux hertziens

Les faisceaux hertziens reposent sur l'utilisation de fréquences très élevées (de 2 GHz à 15 GHz et jusqu'à 40 GHz) et de faisceaux directifs produits par des antennes directionnelles qui émettent dans une direction donnée. La propagation des ondes est limitée à l'horizon optique ; la transmission se fait entre des stations placées en hauteur, par exemple sur une tour ou au sommet d'une colline, pour éviter les obstacles dus aux constructions environnantes. Les faisceaux hertziens s'utilisent pour la transmission par satellite, pour celle des chaînes de télévision ou pour constituer des artères de transmission longue distance dans les réseaux téléphoniques.

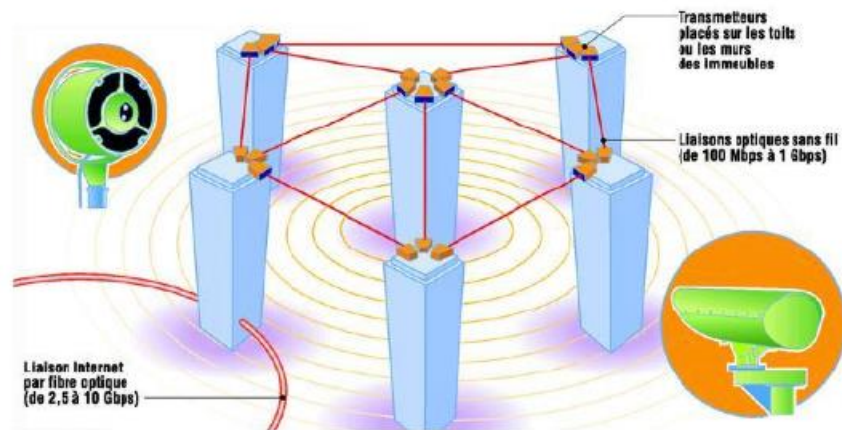
c) Ondes radioélectriques

Les ondes radioélectriques correspondent à des fréquences comprises entre 10 kHz et 2 GHz. Un émetteur diffuse ces ondes captées par des récepteurs dispersés géographiquement. Contrairement aux faisceaux hertziens, il n'est pas nécessaire d'avoir une visibilité directe entre émetteur et récepteur, car celui-ci utilise l'ensemble des ondes réfléchies et diffractées. En revanche, la qualité de la transmission est moindre car les interférences sont nombreuses et la puissance d'émission beaucoup plus faible.

d) Ondes lumineuses

Les liaisons infrarouges et lasers constituent un cas particulier des liaisons hertziennes. Elles sont généralement utilisées, pour interconnecter deux réseaux privés, sur de courtes distances, de l'ordre de quelques centaines de mètres. Elles utilisent des technologies comparables à celles des fibres optiques, mais au lieu d'emprunter un canal en verre, les données prennent la voie des airs à un très haut débit pouvant dépasser 1 GBit/s. Le signal est numérisé et transmis par un rayon infrarouge ou Laser dans une ligne de visée précise. Le plus souvent, ces liaisons s'effectuent entre des

transmetteurs installés au sommets d'immeubles et communiquant en point à point par le biais de faisceaux.



5. Le multiplexage

a) Canal et support

Sur un seul support physique on peut mettre en place plusieurs canaux (voies logiques) pouvant relier :

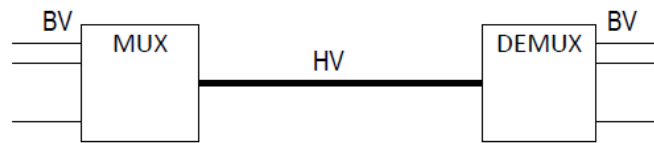
- Un pair d'équipement pour créer un circuit full-duplex.
- Plusieurs paires d'équipements. Pour partager un support entre plusieurs équipements communicants : multiplexage

Donc, on utilise souvent le terme canal plutôt qu'un support pour désigner une voie de transmission entre une paire d'équipements de transmission.

b) Principe de multiplexage

On appelle multiplexage, l'opération consistant à faire transiter sur un seul et même support (qui possède généralement une large base bande passante), des communications appartenant à plusieurs paires d'équipements (émetteurs et récepteurs).

L'équipement qui effectue cette opération est appelé multiplexeur (figure 3.15). On appelle généralement la liaison à multiplexer voie haute vitesse (HV) et la liaison reliant l'équipement avec le multiplexeur voie basse vitesse (BV).



c) Type de multiplexage

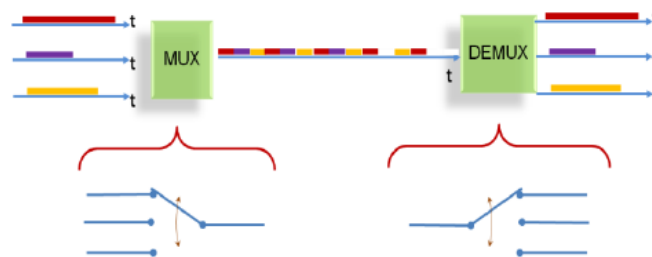
Il y a plusieurs techniques possibles de multiplexage, notamment :

- Multiplexage Fréquentiel (FDM : Frequency Division Multiplexing) : consiste à diviser la bande passante de la voie HV en plusieurs sous bandes (qui ne se chevauchent pas). Chaque sous bande est affectée à une voie BV (figure ci-dessous).

Les sous bandes sont exploitées simultanément, c.-à-d. les équipements peuvent s'échanger l'information en simultanément.



- Multiplexage Temporel (TDM : Time Division Multiplexing) : partage dans le temps l'utilisation de la voie HV en l'attribuant successivement aux différentes voies BV (même si celles-ci n'ont rien à émettre) (figure ci-dessous).

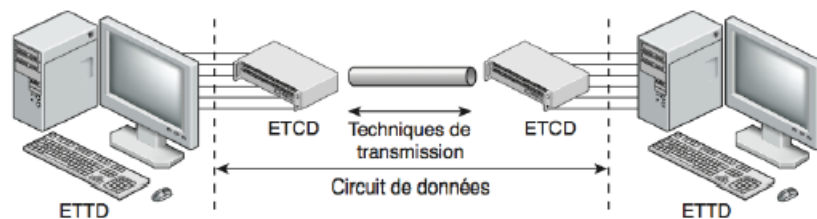


- Multiplexage Statistique : c'est une amélioration du multiplexage temporel. La voie HV est attribuée seulement aux voies BV qui ont effectivement quelque chose à transmettre.

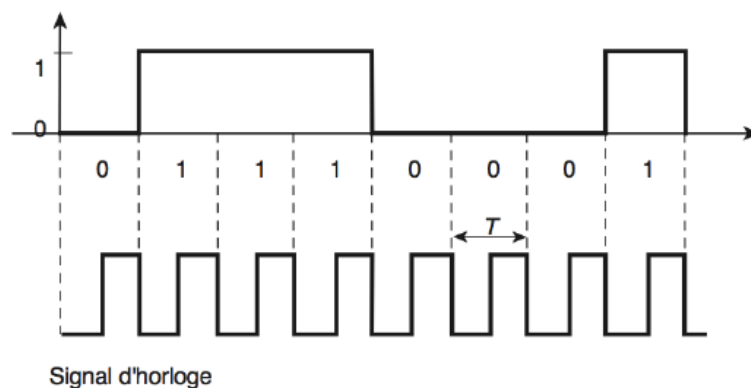
II. Transmission en bande de base (le codage)

1. Codage de l'information

Pour transmettre les données, un équipement spécifique est placé à chaque extrémité du support : soit un modem (modulateur-démodulateur), soit un codec (codeur-décodeur). Cet équipement assure la fabrication des signaux en émission et leur récupération en réception. Pour émettre les données, le modem reçoit la suite de données binaires à transmettre et fournit un signal dont les caractéristiques sont adaptées au support de transmission. Inversement, en réception, le modem extrait la suite des données binaires du signal reçu. Le support de transmission est ainsi transparent à l'utilisateur. Le support de transmission et les deux modems placés à chacune de ses extrémités constituent un ensemble appelé circuit de données.



L'ISO et l'ITU (Union International des Télécommunications) ont attribué des appellations génériques normalisées aux différents éléments de ce système. Ainsi, le modem et le codec s'appellent des ETCD (équipement de terminaison du circuit de données) et l'ordinateur s'appelle ETTD (équipement terminal de traitement des données). L'ETTD émetteur fournit à l'ETCD, régulièrement dans le temps, les données à transmettre. L'ETCD les émet sous forme d'un signal à deux valeurs (correspondant à 0 et 1), appelé message de données synchrone.



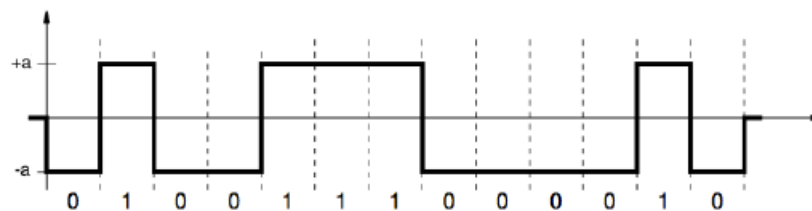
Les intervalles de temps alloués à chaque symbole sont égaux et coïncident avec les périodes successives d'une base de temps (ou horloge) indispensable à l'interprétation du message de données. Si la distance entre les deux ETCDs le permet, le signal numérique est transmis directement, la transmission est appelée dans ce cas bande de base c'est-à-dire dans la même bande du signal original. Dans le cas contraire, le signal est modulé et la transmission est appelée en *large bande* ou en *bande transposée*.

2. Transmission numérique (en bande de base)

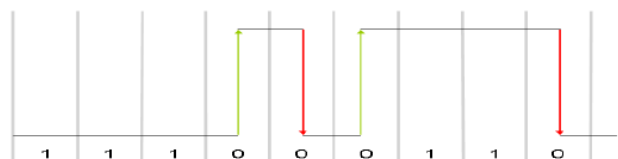
Lorsque la longueur de la liaison ne dépasse pas quelques centaines de mètres, les informations peuvent être transmises sur le support de liaison sans transformation du signal numérique en signal analogique. La transmission en bande de base rencontrée principalement dans les réseaux locaux permet d'obtenir des circuits de données à grand débit et faible portée (débits supérieurs à 1 Mbit/s pour des distances inférieures à 1 Km) en utilisant directement des supports physiques de types métallique (paires torsadées ou câble coaxiaux) ou optique avec éventuellement l'adjonction de répéteurs disposés sur des intervalles allant de 500 mètres à quelques kilomètres. La transmission de longues suites de 0 ou de 1 (silences) peut rendre difficile la récupération de l'horloge causer, par conséquent, la perte de la synchronisation entre l'émetteur et le récepteur. Plusieurs types de codage sont utilisés pour introduire des changements d'état fréquents sur le signal pour éviter les silences.

2.1 Le code NRZ, NRZI

Pour éviter la valeur nulle, le codage NRZ (No return to zero) utilise une valeur $+a$ du signal pour représenter un 1 et $-a$ pour un 0.

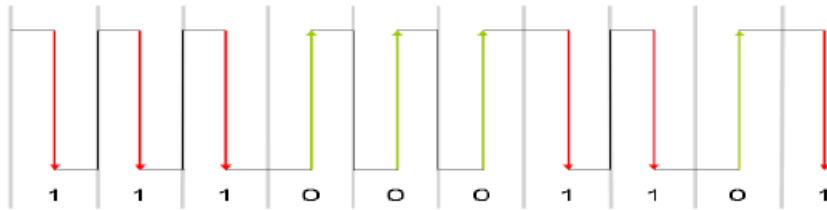


Le code NRZI (No Return to Zero Inverted) présente les mêmes caractéristiques mais pour éviter les successions de 0, le signal reste dans le même état pour coder un 1 et change d'état pour coder un 0.



2.2 Le code Manchester, Manchester différentiel

Le code Manchester peut être défini comme une opération XOR (OU exclusif) réalisée entre l'horloge et les données, d'où une transition systématique au milieu de chaque bit du signal binaire.

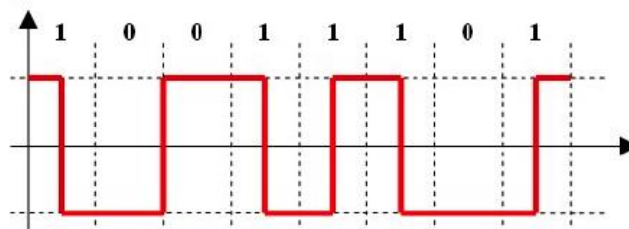


Cependant, le code Manchester différentiel est défini comme une transition systématique réalisée au milieu de chaque bit. Pas de transition pour coder un bit à 1, une transition pour coder un bit à 0.



2.3 Le code de Miller

Une transition au milieu du bit pour un 1, pas de transition en milieu de bit pour un 0. Une transition à la fin du bit pour un 0 si le bit suivant est aussi un 0.



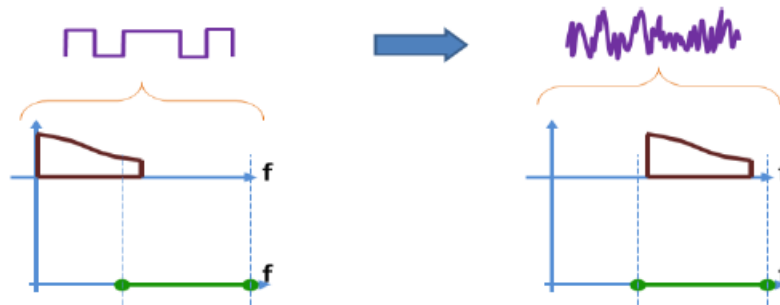
III. Transmission par modulation (les différentes modulations)

1. Principe de modulation

En général, la modulation est la conversion du signal ayant un spectre de fréquence déterminé en autre signal qui aura un spectre de fréquence différent que le premier. Donc

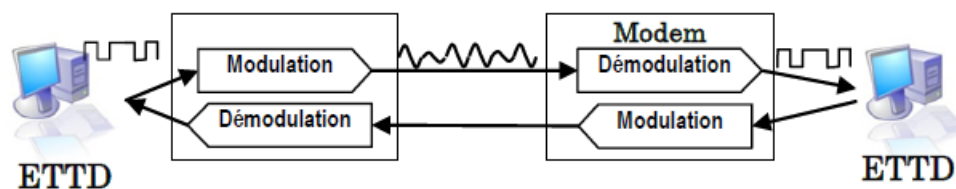
La modulation \longleftrightarrow le décalage du spectre des fréquences

La modulation d'un signal rectangulaire (dont le spectre de fréquence ne se coïncide pas avec la bande passante) est sa conversion en autre signal ayant un autre spectre de fréquence (celui qui se coïncide bien avec la bande passante ou avec une sous bande) et portant la même information. La figure ci-dessous illustre l'interprétation de principe de modulation.



On appelle le nouveau signal : signal modulé, et on appelle l'opération inverse : Démodulation. L'équipement servant à effectuer la modulation (respectivement la démodulation) est dénommé : Modulateur (respectivement : Démodulateur). L'équipement qui effectue la modulation et la démodulation : Modem (Modulateur/Démodulateur).

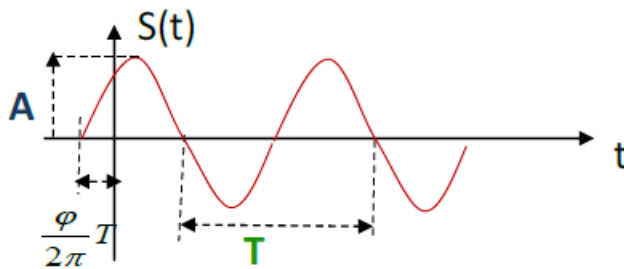
La figure ci-dessous illustre le principe de transmission avec modulation, où les modems sont placés sur les extrémités de support.



En fait, la modulation est basée sur le principe suivant :

- Choisir un signal sinusoïdal dont la fréquence est bien transmise par le canal,
- Faire varier son amplitude, sa fréquence ou sa phase et cela en fonction du signal représentant l'information.

On appelle le signal sinusoïdal de modulation : onde porteuse (ou simplement porteuse). Elle est représentée par la fonction $s(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right)$ dont la représentation graphique est illustrée par la figure suivante.

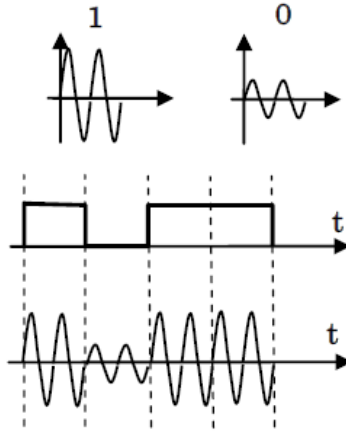


- A : l'amplitude, il indique la puissance du signal.
- $1/T = f$: la fréquence (Hz), ou le nombre de cycles complets par second ($1/T$)
- φ : la phase ou le déphasage

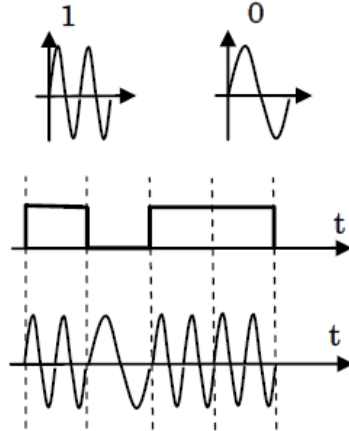
2. Type de modulation

On distingue trois types de base de modulation : modulation d'amplitude, modulation de phase et celle de fréquence. Ces types de modulation sont dits (figure ci-dessous) : modulations bivalentes.

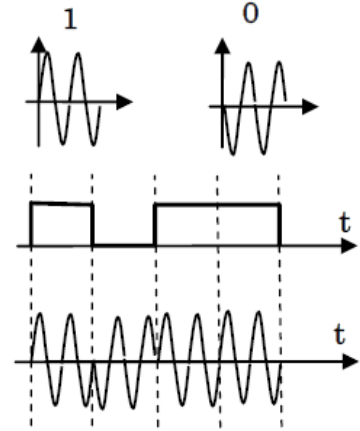
Modulation d'amplitude :



Modulation de fréquence :



Modulation de phase :



- Modulation d'amplitude : selon l'information binaire, on modifie dans le temps l'Amplitude de l'onde porteuse.
- Modulation de phase : Selon l'information binaire, on modifie dans le temps la phase de l'onde porteuse.
- Modulation de fréquence : Selon l'information binaire, on modifie dans le temps la fréquence de l'onde porteuse.
- Modulation hybride : Selon l'information binaire, on modifie dans le temps le deux ou les trois paramètres (fréquence, phase, amplitude)

3. Rapidités de modulation et débit binaire

La rapidité (R) de modulation représente le nombre d'impulsions transmises pendant une unité de temps, et s'exprime en bauds.

$$R = 1/T_{imp} \text{ Bauds}$$

Tel que T_{imp} est la durée de l'impulsion

- Dans le cas de modulation bivalente, une impulsion porte une valeur pour un bit, donc : $T_{imp} = T_{bit}$, ce qui implique $R = D$.
- Dans le cas de modulation multi-valeurs (n'est pas bivalente), une impulsion de base peut porter une valeur de n bit ($n > 1$), donc $T_{imp} = n * T_{bit}$ ce qui implique: $D = R * n = R \log_2(V)$, tel que V est la valence (le nombre d'impulsions de base).