

Chapitre 2

Transmission de données

Dans ce chapitre

1. Transmissions de données et caractéristiques
2. Types de transmission de données
3. Les supports physiques
4. Les modes de Transmission de données
5. Multiplexage des données
6. ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line),
7. Le Multiplexage MIC, SDH, PDH

Evaluations

- ✓ Exercices

Dans un réseau téléinformatique, les ordinateurs s'échangent des informations qui consistent en messages de types divers : texte, son, image, vidéo. En fait, ces informations sont de nature numérique, çad *encodés* sous forme d'éléments binaires ou bits. Cette opération de *codage* est nécessaire avant tout traitement ou transmission.

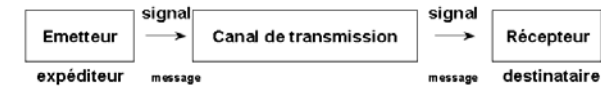
Pour pouvoir effectuer un transfert d'informations, il est nécessaire de les *encoder* en *signaux*. Les signaux sont ainsi les véhicules de l'information dans un réseau de communication.

La transmission physique de l'information est prise en charge par la couche la plus basse du modèle OSI dans un réseau informatique, sur un *canal de transmission* physique.

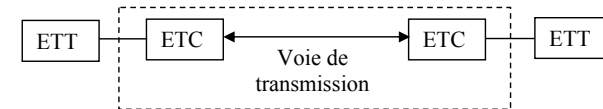
1. Transmissions de données et caractéristiques

1.1 Qu'est ce qu'un canal de transmission ?

Pour que la transmission de données puisse s'établir entre deux machines, il doit exister entre elles une ligne de transmission appelée *canal de transmission*.



Un canal de transmission est une liaison entre deux machines. Il n'est pas forcément constitué d'un seul support physique de transmission : en effet, les machines d'extrémités (les ETTD) utilisent chacun un ETCD adapté au type de support auquel il est relié. On appelle *circuit de données* l'ensemble constitué des ETCD de chaque machine et de la ligne de données. Les données circulent sur un canal de transmission sous-forme d'ondes électromagnétiques, électriques ou même acoustique.



1.2 Représentation des données

La transmission de données sur un support physique se fait par propagation d'un phénomène vibratoire (lumière, son, électricité). Il en résulte un signal ondulatoire de la grandeur physique que l'on fait varier :

- Dans le cas de la lumière, il s'agit d'une onde lumineuse.
- Dans le cas du son, il s'agit d'une onde acoustique.
- Dans le cas de la tension ou l'intensité d'un courant électrique, il s'agit d'une onde électrique.

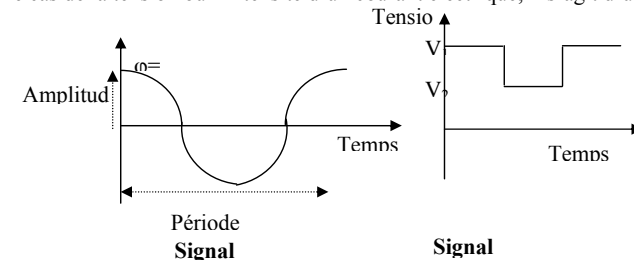


Figure 2.1 : Type de Transmission.

Lorsque l'information est représentée par la variation d'une seule grandeur physique (tension électrique, intensité lumineuse, etc), on parle alors de *transmission numérique*. Lorsque l'information est représentée par la variation des paramètres intrinsèques de l'onde, on parle alors de *transmission analogique*. Une onde électromagnétique est caractérisée par une *fréquence*, une *amplitude* et une *phase*. Le signal est obtenu par la fonction :

$$y = A \sin(2\pi f t + \varphi)$$

où A est l'amplitude, $f = 1/p$ la fréquence (en Hertz) et p la période (en secondes), φ la phase (en radian).

1.3 Perturbations

La transmission de données sur une ligne ne se fait pas sans pertes. Tout d'abord, le temps de transmission n'est pas immédiat, ce qui impose une certaine « synchronisation » des données à la réception. D'autre part, des parasites ou des dégradations du signal peuvent apparaître (voir *figure 2.2*):

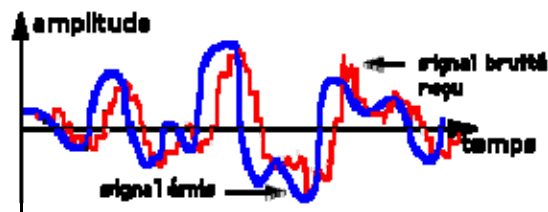


Figure 2.2 : Signal bruité.

♦ Bruit

Est l'ensemble des perturbations modifiant localement la forme du signal. On distingue généralement deux types de bruit :

• Le bruit blanc

Est une perturbation uniforme du signal, c'est à dire qu'il rajoute au signal une petite amplitude dont la moyenne sur le signal global est nulle. Le bruit blanc est généralement caractérisé par un ratio appelé « rapport signal / bruit » qui traduit le pourcentage d'amplitude du signal par rapport au bruit (son unité est le décibel). Le bruit blanc est induit généralement par les connecteurs les amplificateurs et les équipements intermédiaires interfaçant les câbles.

• Les bruits aléatoires

Sont des petits pics d'intensité provoquant des erreurs de transmissions. Ce type de bruits est induit par une source électromagnétique externe affectant momentanément ou de manière aléatoire le signal.

♦ L'affaiblissement

Représente la perte de signal en énergie dissipée sur la ligne. L'affaiblissement se traduit par un signal de sortie plus faible que le signal d'entrée et est caractérisé par la valeur suivante :

$$A = 10 \log_{10} (\text{rapport d'affaiblissement})$$

$$\text{Rapport d'affaiblissement} = \frac{\text{Amplitude du signal reçu}}{\text{Amplitude du signal émis}}$$

Notons que l'affaiblissement est proportionnel à la longueur de la voie de transmission et à la fréquence du signal. En d'autres termes, le signal s'affaiblit en fonction de la distance parcourue. Par ailleurs, certaines fréquences tendent à s'affaiblir plus rapidement que d'autres.

♦ La distorsion de phase

Caractérise le déphasage entre le signal en entrée et le signal en sortie. Ces erreurs sont dues en général à une mauvaise synchronisation entre l'émetteur et le récepteur.

Le bruit le plus gênant est évidemment le bruit aléatoire. Il peut modifier notablement le signal à certains moments et produire des confusions entre "0" et "1". Pour cette raison, il faut veiller à ce que la puissance du signal soit supérieure à celle du bruit.

1.4 Caractéristiques d'une transmission

Une transmission de données est caractérisée par :

- Un taux d'erreurs induits ;
- Une vitesse de transmission ;
- Un temps de transfert de l'information.

♦ Taux d'erreurs

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.

♦ Vitesse de transmission

• **Un état** est la plus petite portion du signal échangée entre deux ETCD. La durée d'un état est notée t ou Δ . Cette durée est fixe et ne varie pas d'un état à un autre.

• n : Le nombre de bits représenté par un état.

• V : La *valence* du signal désignant le nombre d'états différents dans le signal.

Exemple

$V=2 \rightarrow 2$ états à représenter 0 et 1

$V=4 \rightarrow 4$ états e_i à représenter en combinant 2 bits.

• **La rapidité de modulation R** est le nombre d'états transmis en une seconde : $R = 1 / t$ (en bauds).

• **Le débit binaire D d'une voie de transmission** est le nombre maximum de symboles binaires transmis par seconde sur cette voie. Pour ce faire, il suffit de regarder dans chaque état le nombre de bits qui sont transmis, ou de déterminer sur la ligne le nombre de valeurs ou d'états différents qui existent et d'appliquer la formule suivante : $n = \log_2 V$.

La relation entre D et R peut s'exprimer de la façon suivante: $D = n R$ bits/s. Dans le cas où l'on transporte 1bit par état, nous obtenons : $R = D$.

• **Temps de transfert** est la durée de temps qui sépare le début d'émission de la fin de réception :

$$T_{\text{transfert}} = T_{\text{émission}} + T_{\text{propagation}}$$

Le *temps d'émission* dépend du débit et désigne le temps nécessaire pour que tout le message soit injecté sur le support par l'ETCD :

$$T_{\text{émission}} = \text{Taille du message envoyé} / \text{Débit binaire.}$$

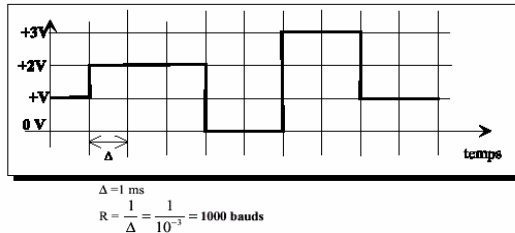
Le *temps de propagation* dépend de la distance couverte et du support et désigne le temps nécessaire pour que le signal se propage de l'émetteur vers le récepteur.

$T_{\text{propagation}} = \text{distance parcourue par le message} / \text{vitesse de propagation sur le support}$

Exemple

On considère le signal numérique dont on relève l'échantillon représentatif suivant : $V=4$, $n = \log_2(V)=2$ et

$D = R \times n = 2000 \text{ bits/secondes}$.



1.5 Caractéristiques d'un canal de transmission

Un canal de transmission est caractérisé par :

♦ La bande passante

D'une voie de transmission (*bandwidth*), notée **W**, est l'intervalle de fréquences sur lequel le signal ne subit pas un affaiblissement supérieur à une certaine valeur (généralement 3db, car 3db correspond à un affaiblissement du signal de 50%). Concrètement, un circuit de données est assimilable à un filtre de type *Passe Bande*. Autrement dit, seule une certaine bande de fréquence est correctement transmise. La réponse spectrale d'un circuit parfait indique une atténuation totale de toutes les fréquences extérieures à la bande. Dans la pratique, la réponse n'est pas aussi franche, et on définit en général la *bande passante* (encore appelée *largeur de bande* du circuit) par : $W = f_2 - f_1$.

Les fréquences f_1 et f_2 , limitant la bande passante, correspondent à un signal transmis avec une puissance réduite de celle d'origine d'un rapport de moitié $P_1 = P_0/2$, avec P_0 représentant la puissance du signal avant la transmission. Cet affaiblissement est dit à 3 dB (décibel) : $10 \log_{10} (P_0/P_1) = 10 \log_{10} (2) = 3 \text{ Db}$ (voir figure 2.3).

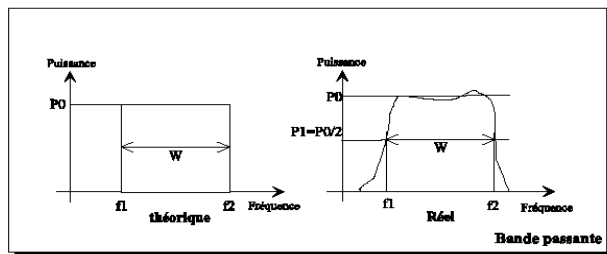


Figure 2.3 : Bande passante d'une voie de transmission

Dans la pratique, la bande passante est souvent exprimée comme étant une plage de fréquences allant de 0 à la fréquence à laquelle au moins la moitié de la puissance du signal (P_1) est préservée. La bande passante est très importante pour un circuit de données, puisqu'elle détermine directement sa *capacité de transmission*. C'est une caractéristique physique du support de transmission et dépend généralement de la fabrication, de l'épaisseur et de la longueur de ce support. Dans certains cas, un filtre est introduit dans le circuit pour limiter la largeur de la bande passante mise à disposition du

client. Par exemple, le câble téléphonique peut avoir une bande passante de 1MHz sur de courtes distances, mais les opérateurs ajoutent un filtre qui limite la largeur de bande à environ 3100Hz, qui convient à l'entretien d'une conversation téléphonique.

♦ **La capacité C** d'une voie de transmission (formule de *Shanon*) est la quantité d'informations en (bits) pouvant être transmise sur la voie en une seconde. $C = W \log_2 (1 + S/B)$ en bps.

Où : W est la largeur de bande en Hz et S/B représente le rapport *signal sur le bruit* de la voie qui correspond au rapport de la puissance du signal sur la puissance du bruit. Par conséquent, plus ce rapport est grand, plus la capacité de la voie est augmentée.

Exemple :

Avec une ligne téléphonique usuelle de largeur de bande $W=3100 \text{ Hz}$ et un rapport Signal/Bruit de 30 dB, la capacité de transmission est d'environ 10.600 bits/s. En pratique, les débits binaires sur de telles voies n'excèdent guère 9600 bits/s.

♦ Rapidité maximale

De manière empirique, il a été constaté aussi que la rapidité maximale que peut atteindre un ETCD est contrainte par la bande passante du support physique auquel il est connecté : $R_{\text{max}} \leq 2 W$.

1.6 Trafic

Le *trafic* est une notion liée à l'utilisation d'une voie de transmission. Le trafic permet de connaître le degré d'utilisation d'une voie et par conséquent de choisir une voie adaptée à l'utilisation que l'on veut en faire ; il ne servirait à rien, en effet, de posséder des lignes de transmission surdimensionnées, sinon à perdre de l'argent en abonnements. Pour évaluer le trafic, on considère qu'une transmission ou communication est une session de durée moyenne T (en secondes) ; soit N_c le nombre moyen de sessions par heure. *L'intensité du trafic* est alors donnée par l'expression : $E = T \times N_c / 3600$ (en Erlangs).

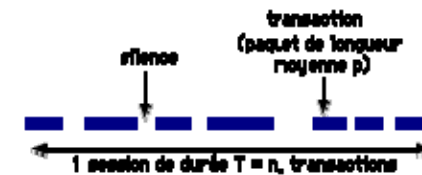


Figure 2.4: Taux d'occupation d'une voie

Autrement dit, l'intensité du trafic mesure le temps d'utilisation de la voie par heure. En fait, une analyse plus fine est quelquefois nécessaire car une *session* comporte un certain nombre de "silences", notamment dans les applications conversationnelles. On peut distinguer les deux cas extrêmes suivants concernant les types de sessions :

- Sessions où T est pleinement utilisé (rare)
- Sessions où T comprend des "silences"

Dans ce dernier cas, l'intensité du trafic ne donne pas l'*occupation réelle* du canal. On décompose la session en *transactions* de longueur moyenne p en bits, entrecoupées par des silences. Soit N_t le nombre moyen de transactions par session. D étant le débit nominal de la voie, le débit effectif de la voie (pour cette utilisation) est : $d = \frac{N_t \cdot p}{T}$ et le taux d'occupation du canal est défini par le rapport :

$$e = \frac{d}{D}$$

Exemple :

Soit un calcul scientifique à distance où l'utilisateur est amené à dialoguer avec un ordinateur central. On suppose $p = 900$ bits, $N_t = 200$, $T = 2700$ s, $N_c = 0.8$, $D = 1200$ b/s. On déduit, $E = 0.6$ Erlangs ; donc la voie est utilisée théoriquement à 60%. Par ailleurs, en détaillant nous obtenons $d=200/3$ et par conséquent $\theta = 200/3600 = 0.05$. La voie est utilisée effectivement à 5% de ses capacités.

2. Types de transmission de données

Lorsque des données sont transmises, elles peuvent se trouver sous deux formes : *analogique* ou *numérique*. D'où les deux types de transmission analogique et numérique.

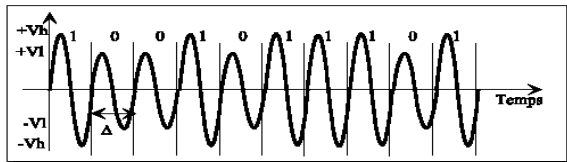
2.1 Transmission analogique (modulation de base)

La transmission analogique de données consiste à faire circuler des informations sur un support physique de transmission sous forme d'une *onde*. La transmission des données se fait par l'intermédiaire d'une *onde porteuse*, une *onde simple* dont le seul but est de transporter les données par modification de l'une de ces caractéristiques (amplitude, fréquence ou phase). C'est la raison pour laquelle la transmission analogique est généralement appelée "*transmission par modulation d'onde porteuse*". Pour transmettre des signaux en analogique, on utilise des signaux avec des fréquences choisies, ce qui permet de limiter les pertes et donc de transmettre sur des distances plus longues. Il est à noter que les signaux manipulés à l'intérieur d'un terminal sont numériques. Par conséquent, pour transmettre ces données numériques de façon analogique, on utilise un ETCD spécifique appelé, *Modem* ; son rôle est :

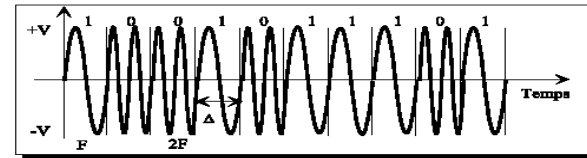
- **A l'émission** : de convertir des données numériques (un ensemble de 0 et 1) en signaux numériques en signaux analogiques. On appelle ce procédé « *la modulation* ».
- **A la réception** : de convertir le signal analogique en données numériques. Ce procédé est appelé « *démodulation* ».

C'est pour cela que le modem est en réalité l'acronyme de *Modulateur/Démodulateur*. Dans un modem, selon le paramètre de l'onde porteuse que l'on fait varier, on distinguera trois types de transmissions analogiques. Dans chacun des exemples, la suite de bits à émettre est la suite ci-contre : **1001011101** : les modulations les plus simples sont *ASK* (amplitude shift Keying), les modulations *FSK* (frequency SK) et les modulations *PSK* (phase SK).

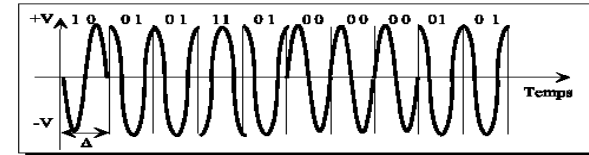
- **La modulation d'amplitude ou l'ASK** : L'amplitude du signal varie du simple ou double suivant que l'on veuille transmettre un **0** ou un **1**.



- **La modulation de fréquence ou FSK** : La fréquence du signal varie du simple ou double suivant que l'on transmette un **0** ou un **1**. Notons que pour garantir que tous les états d'un même signal aient la même durée. Le nombre d'oscillations des états de fréquence F est doublé par rapport à ceux de fréquence $2F$. D'ailleurs, un état à la base peut être représenté par plus d'une oscillation (sinusoïde) ayant les mêmes caractéristiques. Ce procédé permet de rendre le signal plus robuste contre les perturbations.



- **La modulation de phase ou PSK** : La phase du signal varie en fonction du bit à envoyer.



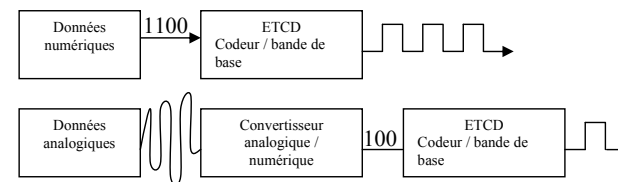
La composition de ces trois techniques de modulations est possible et permet d'augmenter la valence et donc le débit de la transmission.

2.2 Transmission numérique

La transmission numérique consiste à faire transiter les informations sur le support physique de communication sous forme de signaux numériques (0 et 1). Pour faire passer 0 ou 1, il faut coder par un signal possédant deux états, comme par exemple :

- Deux niveaux de tension par rapport à la masse.
- La présence ou absence de courant dans un fil.
- La présence / absence du son.
- La présence / absence de lumière,

Cette transformation de l'information binaire sous forme d'un signal à deux états est réalisée par l'ETCD, appelé aussi *codeur bande de base*, d'où l'appellation de *transmission en bande de base* pour désigner la transmission numérique.



♦ Codage des signaux

Pour que la transmission soit optimale, il est nécessaire que le signal soit codé de façon à faciliter sa transmission sur le support physique. Plusieurs codages ont été définis (voir figure 2.5) :

- **Codage tout ou rien (unipolaire)** : c'est le plus simple, un courant nul code le 0 et un courant positif indique le 1. Inconvénients : Consommation d'électricité importante dans le cas où on émet une série de 1. Problème de détection du signal. Problème de désynchronisation lors d'une longue série de 1 ou de 0.

• **Le code bipolaire** : c'est un code tout ou rien dans lequel le 0 est représenté par un courant nul, mais le 1 est représenté par un courant alternativement positif ou négatif pour éviter de maintenir des courants continus.

• **Codage NRZ (No Return to Zero)** : Le codage NRZ est le premier système de codage et le plus simple. Il consiste à coder un 1 avec un signal +V et un 0 par un signal -V. De cette façon, la composante continue du signal est nulle (s'il y a globalement autant de 1 que de 0), ce qui donne une consommation moins importante. Comme le signal n'est jamais nul, cela permet au récepteur de détecter ou non l'absence du signal. Son défaut est que le signal continu gêne la synchronisation entre émetteur et récepteur.

• **Codage RZ (Return to Zero)** : Le 0 est codé par un courant nul et le 1 par un courant positif qui est annulé au milieu de l'intervalle de temps prévu pour la transmission d'un bit.

• **Codage Manchester** : L'idée de base est de provoquer une transition du signal pour chaque bit transmis. (inversion du signal systématique au milieu de la période de l'horloge), ce qui garantit l'impossibilité d'avoir un signal continu. Pour transmettre un 1, il s'agira par exemple de considérer un front montant et pour un 0 considérer un front descendant. La synchronisation des échanges entre émetteur et récepteur est toujours assurée, même lors de l'envoi de longues séries de 0 ou de 1. Par ailleurs, un bit 0 ou 1 étant caractérisé par une transition du signal et non par un état comme dans les autres codages, il est très peu sensible aux erreurs de transmission. La présence de parasites peut endommager le signal et le rendre incompréhensible par le récepteur, mais ne peut pas transformer accidentellement un 0 en 1 ou inversement.

• **Le codage Miller** : On diminue le nombre de transitions comparativement au codage Manchester en effectuant une transition (de haut en bas ou l'inverse) au milieu de l'intervalle pour coder un 1 et en n'effectuant pas de transition pour un 0 suivi d'un 1. Une transition est effectuée en fin d'intervalle pour un 0 suivi d'un autre 0.

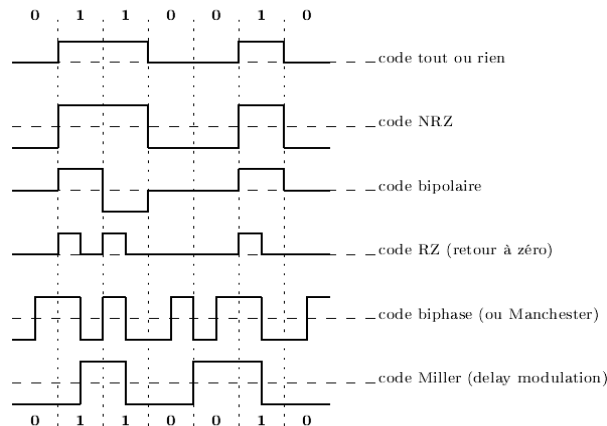


Figure 2.5 : Les principaux codages en bande de base

3. Les supports physiques

Les supports physiques sont des éléments permettant de faire circuler les informations entre les équipements de transmission. Différents types de supports ont vu le jour, faisant appel à des technologies différentes, le but étant toujours d'atteindre les objectifs suivants:

• Grande bande-passante.

- Possibilité d'utiliser ces câbles sur de longues distances.
- Faible encombrement, facile à poser et à installer.
- Connecteurs simples et résistants.
- Faible coût de fabrication et d'installation.

Pour choisir un type de support à installer, plusieurs critères entrent en jeu :

- Combien de matériel doit-on raccorder ?
- Quelle longueur de câble faut-il ?
- Quelle vitesse de transmission désire-t-on atteindre ?
- Dans quel environnement va se trouver le câble (perturbations électromagnétiques ...) ?

On classe généralement ces supports en trois catégories, selon le type de grandeur physique qu'ils permettent de faire circuler, et selon leur constitution physique :

♦ Les supports filaires électriques

Permettent de faire circuler une grandeur électrique sur un câble généralement métallique.

- Paire de files torsadées.
- Câble coaxial (câble *Ethernet fin*), gros câble (*gros Ethernet*).

♦ Les supports optiques

Permettent d'acheminer les informations sous forme d'une onde lumineuse.

♦ Les supports aériens (sans fil)

Ils permettent la circulation d'ondes électromagnétiques ou radioélectriques diverses. La propagation se fait par ligne droite (radio et télédiffusion, ...). Pour permettre des liaisons à grande distance, on utilise des satellites.

• **Avantages** : permet une liaison à grande distance sans câblage.

• **Inconvénients** : Affaiblissement des signaux corrélé avec un temps de propagation important de l'ordre de 260 ms pour une liaison satellitaire.

Selon le type du support physique, la grandeur physique a une vitesse de propagation plus ou moins rapide. Par exemple, le son se propage dans l'air à une vitesse de l'ordre de 300m/s alors que la lumière a une célérité de 300 000 km/s.

3.1 Les supports filaires électriques

♦ Le câble coaxial

Le câble coaxial (*coax* en abrégé), a longtemps été le câblage de prédilection pour la simple raison qu'il est peu coûteux et facilement manipulable (poids, flexibilité,...).



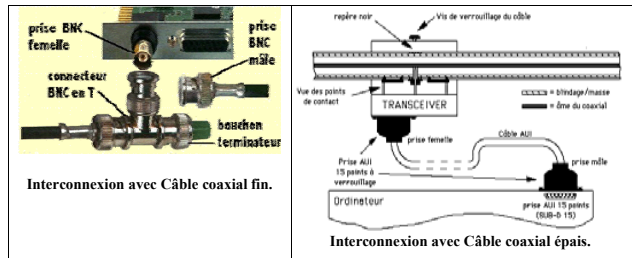


Figure 2.6: Câbles Coaxiaux et Interconnexion

♦ Constitution

Un câble coaxial (voir **figure 2.6**), est constitué d'une carte centrale (appelée *âme*), c'est à dire un fil de cuivre enveloppé dans un isolant, puis d'un blindage métallique tressé et enfin d'une gaine extérieure.

- La *gaine* permet de protéger le câble de l'environnement extérieur. Elle est habituellement en caoutchouc (parfois en chlorure de polyvinyle (PVC) éventuellement en Téfalon.
- Le *blindage* (enveloppe métallique), entourant les câbles qui permet de protéger les données transmises sur le support des parasites (bruit), pouvant causer une distorsion du signal transmis.
- L'*isolant* entourant la partie centrale est constitué d'un matériau diélectrique permettant d'éviter tout contact avec le blindage provoquant des interactions électriques (court circuit).
- L'*âme*, accomplissant la tâche de transport du signal, est généralement composée d'un seul brin en cuivre ou de plusieurs brins torsadés.

Grâce à son blindage, le câble coaxial peut être utilisé sur les longues distances et les liaisons haut débit des infrastructures réseaux. On le réserve toutefois pour des installations de base dans les réseaux locaux.

♦ Types

On distingue habituellement deux types de câbles coaxiaux.

♦ **Câble coaxial fin (10 BASE 2)** : nommé aussi *thinnet* ou *cheapernet*, le câble fin est de diamètre 6mm, très flexible et peut être utilisé dans la majorité des réseaux sur une distance de 185 m sans affaiblissement. Il fait partie de la famille des *RJ58* dont l'impédance (résistance) est égale à 50ohms. La bande passante moyenne est de 10Mbps. La connexion d'une machine au réseau se fait à l'aide de connecteurs de type *BNC* à baïonnettes, avec un branchement à l'aide de connecteurs en *T*.

♦ **Câble coaxial épais (10 BASE 5)** : nommé aussi *thicknet* ou *yellow cable*, c'est un câble blindé de plus gros diamètre 12mm et de 50ohms d'impédance. Il a longtemps été utilisé dans les réseaux Ethernet. Etant donné que son âme a un plus gros diamètre, la distance susceptible d'être parcourue par des signaux sans affaiblissement est de 500M et sa bande passante moyenne est de 10Mbps. Il est donc souvent employé comme câble principal (*backbone*) pour relier des petits réseaux. La connexion d'une machine au réseau à l'aide d'un câble *Thicknet* s'effectue à travers son port *AUI* (*Access Unit Interface*) de 15 broches, un câble *AUI* d'une longueur maximum de 5m et d'un *'Tranceiver'* (transmetteur) permettant la jonction physique sur le câble coaxial (Voir **figure.2.6**).

Nom	Couleur	Impédance (Ω)	âme	Capacité (pF/m)	Diamètre Ext(mm)	Affaiblissement (db/100 M)
Ethernet 802.3	jaune	50	Rigide	90,2	10,3	1,2 à 5Mhz

Thin net	noir	50	Rigide	83,6	4,57	6db/185M à 5Mhz
Cheap Ethernet	jaune	50	19brins de 0,2		5.46	
RG 58 Thin Ethernet 10 Mbps	gris	50	Rigide	78,8		36db à 400 MHz 150db à 3GHZ
Câble TV	blanc	75	Rigide		7,2	

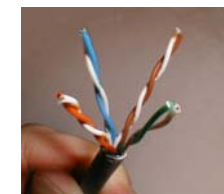
Tableau 2.1 : Caractéristique des Câbles Coaxiaux

♦ Utilisation

Les câbles coaxiaux (voir **tableau 2.1**), présentent de meilleures caractéristiques électriques que les câbles à paires torsadées. Ils offrent une bande passante et une protection contre les rayonnements électromagnétiques parasites satisfaisantes. Les performances de ce type de câble dépendent aussi de la qualité des isolants des conducteurs et de la longueur des câbles. Plus la distance à parcourir pour le signal est faible, plus la vitesse de transmission peut être élevée. On atteint des vitesses de transmission de 100 Mbit/s sur des distances inférieures au kilomètre. Sur plusieurs centaines de kms, les vitesses de transmission sont de l'ordre de 100 Kbit/s à quelques Mbit/s. On transmet généralement avec ce type de câble des signaux en bande de base (Manchester, NRZ, etc) dans le cas d'une utilisation sur des réseaux locaux. On transmet également des signaux analogiques (sinusoidaux en modulation de phase, amplitude, fréquence) dans le cas d'une utilisation pour la distribution de la TV par câble et dans les grandes artères de raccordement interurbaines pour le téléphone. On peut transmettre avec ces derniers câbles des signaux pouvant atteindre une fréquence de 450 Mhz sur des distances de plusieurs kilomètres. Dans les câbles modernes, la largeur de bande se rapproche de 1Ghz. Ce type de câble était largement utilisé au sein du système téléphonique sur les lignes interurbaines, mais il est maintenant remplacé par de la fibre optique, surtout sur les artères de longue distance.

♦ La paire torsadée (Twisted pair câble)

Ce câble reprend le principe du câble téléphonique d'intérieur et est utilisé principalement pour dans les réseaux locaux en topologie en étoile, mais aussi dans les réseaux en anneau et les liaisons USB.



Câble en paires torsadées



Connecteur RJ 45



Câble



Câble



Câble STP

Figure 2.7 : Câbles en paires torsadées.

♦ Constitution

Une paire torsadée est constituée d'au moins deux brins de cuivre d'une épaisseur d'environ 1mm, entrelacés en torsade et recouverts d'isolants (voir **figure 2.7**). Le câble peut être constitué de plusieurs paires torsadées regroupées et placées dans une *gaine protectrice*. Les fils d'une *paire torsadée* sont enroulés en hélice (torsade), l'un autour de l'autre. Cette configuration a pour but de maintenir précisément la distance entre les fils. L'entrelacement des paires en *torsades* permet de supprimer les bruits (interférences électriques), dus aux autres paires adjacentes ou aux autres sources. En effet, les ondes rayonnées de chaque torsade s'annulent (alors que deux fils parallèles constituent une antenne rayonnante). Le maintien de la distance entre fils de paire permet de définir une *impédance caractéristique*. Les contraintes géométriques (épaisseur de l'isolant/diamètre du fil) maintiennent cette impédance autour de 100 ohms :

- 100 ohms pour les réseaux [ethernet](#) en étoile ;
- 150 ou bien 105 ohms pour les réseaux *token ring* ;
- 100 ou bien 120 ohms pour les réseaux de téléphonie ;
- 90 ohms pour les câbles [USB](#).

Plus le nombre de torsades est important, plus le bruit est réduit. Le nombre de torsades moyen par mètre fait partie de la spécification du câble, mais chaque paire d'un câble est torsadée de manière légèrement différente pour éviter les interférences. Les paires torsadées sont souvent blindées afin de limiter les interférences. Comme le blindage est fait de métal, celui-ci constitue également un référentiel de masse. Le blindage peut être appliqué individuellement aux paires ou à l'ensemble formé par celles-ci. Lorsque le blindage est appliqué à l'ensemble des paires, on parle d'*écranage*.

♦ **Types** : Il existe plusieurs types de paires torsadées :

- **Paire torsadée non blindée** : *Unshielded twisted pair (UTP)* - dénomination officielle (U/UTP). La paire torsadée *non blindée* n'est pas entourée d'un blindage protecteur. C'est le type de câble souvent utilisé pour le téléphone et certains réseaux informatiques domestiques. La longueur maximale d'un segment de paires UTP est de 100 mètres.
- **Paire torsadée écranée** : *Foiled twisted pair (FTP)* ou *screened unshielded twisted pair* - dénomination officielle (F/UTP). Les *paires torsadées* ont un blindage général assuré par une feuille d'aluminium. L'écran est disposé entre la gaine extérieure et les 4 paires torsadées. Elle est utilisée pour le téléphone et les réseaux informatiques.
- **Paire torsadée blindée** : *Shielded twisted pair (STP)* - nouvelle dénomination U/FTP. Chaque *paire torsadée blindée* est entourée d'une couche conductrice de blindage, de façon similaire à un câble coaxial. Cela permet une meilleure protection contre les interférences. Elle est communément utilisée dans les réseaux en anneau. Le câble STP utilise une gaine de cuivre de meilleure qualité et plus protectrice que la gaine utilisée par le câble UTP. Il contient une enveloppe de protection entre les paires et autour des paires. Dans le câble STP, les fils de cuivre d'une paire sont eux-mêmes torsadés, ce qui fournit au câble STP un excellent blindage, c'est-à-dire une meilleure protection contre les interférences. D'autre part, il permet une transmission plus rapide et sur une plus longue distance.
- **Paire torsadée écranée et blindée** : *Shielded and foiled twisted pair (SFTP)* - nouvelle dénomination SF/UTP. Câble doté d'un double écran commun à l'ensemble des paires (feuille métallisée et tresse). Chaque paire torsadée est entourée d'une couche conductrice de blindage en aluminium. L'ensemble des paires torsadées ont un écran collectif en aluminium.

♦ Catégorisation

La paire torsadée est normalisée en différentes catégories, selon ses performances et, par conséquent, ses applications :

- **Catégorie 1** : Câble téléphonique traditionnel (transfert de voix mais pas de données).

- **Catégorie 2** : Cette catégorie de câble permettait la transmission de données à 4 Mbit/s avec une bande passante de 2 MHz, notamment pour les réseaux de type Token Ring.
- **Catégorie 3** : La catégorie 3 est un type de câblage permettant une bande passante de 16 MHz. Ce type de câble de nos jours ne sert principalement plus qu'à la téléphonie sur le marché commercial, aussi bien pour les lignes analogiques que numériques. Il est également utilisé pour les réseaux *Fast Ethernet* (100 Mbps). Ce type de câblage est en cours d'abandon (en 2007) par les opérateurs au bénéfice de câbles de catégorie 5e ou supérieure, pour la transmission de la voix comme des données.
- **Catégorie 4** : La catégorie 4 est un type de câblage permettant une bande passante de 20 MHz. Ce standard fut principalement utilisé pour les réseaux Token Ring ou les réseaux 10BASE-T.
- **Catégorie 5** : La catégorie 5 permet une bande passante de 100MHz et un débit maximum de 100 Mbits/s. Ce standard permet l'utilisation du 100BASE-TX ainsi que diverses applications de téléphonie ou de réseaux (Token ring, ATM).
- **Catégorie 5e** : La catégorie 5e (*enhanced*) peut permettre une vitesse allant jusqu'à 1 000 Mbits/s. C'est un type de câblage permettant une bande passante de 100 MHz. La norme est une adaptation de la catégorie 5.
- **Catégorie 6** : La catégorie 6 est un type de câblage permettant une bande passante de 250 MHz et plus.
- **Catégorie 6a** : Ratifiée le 8 février 2008, la norme 6a est une extension de la catégorie 6 avec une bande passante de 500 MHz. Cette norme permet le fonctionnement du 10GBASE-T sur 90 mètres.
- **Catégorie 7** : La catégorie 7 a une bande passante de 600 MHz. Elle permet l'acheminement d'un signal de télévision modulé en bande VHF ou UHF.
- **Catégorie 7a** : La catégorie 7a a une bande passante de 1 GHz et permet un débit allant jusqu'à 10Gbits/s.

♦ Branchement

Ce type de câble est adapté pour les réseaux locaux à faible distance. Il se branche à l'aide d'un connecteur *RJ-45*. Ce connecteur est similaire au connecteur *RJ-11* utilisé dans la téléphonie, mais est différent sur certains points : le connecteur *RJ-45* est légèrement plus grand et ne peut être inséré dans une prise de téléphone *RJ-11*. De plus, il se compose de huit broches alors que le connecteur *RJ-11* n'en possède que quatre.

♦ Utilisation

La plupart des installations téléphoniques utilisent un câble *UTP*. Beaucoup de locaux sont pré-câblés pour ce genre d'installation (souvent en nombre suffisant pour satisfaire les besoins futurs). Si la paire torsadée préinstallée est de bonne qualité, il est possible de transférer des données et donc de l'utiliser en réseau informatique. Il faut faire attention cependant aux nombres de torsades et aux autres caractéristiques électriques requises pour une transmission de données de qualité. Le majeur problème provient du fait que le câble *UTP* est particulièrement sujet aux interférences (signaux d'une ligne se mélangeant à ceux d'une autre ligne). La seule solution réside dans le blindage. La paire torsadée est utilisée pour les liaisons d'abonné et dans les réseaux locaux. Ce type de câblage prend le nom d'universel, car il permet le passage de différents types d'informations: réseau informatique *Ethernet* ou *Token Ring*, téléphonie, domotique, vidéo etc. La distance maximum atteignable, en Ethernet et sans ré-amplification, sur de tels câbles est de 100m (y compris les câbles de renvoi et les câbles de bureau). Pour des distances plus longues, des répéteurs sont nécessaires. En raison de ses performances satisfaisantes et son faible coût, la paire torsadée est largement utilisée et le sera vraisemblablement encore longtemps. La bande passante potentielle, pour des câbles certifiés de catégorie 6, est de 250Mhz, offrant un débit de 1Gbits/s (alors que les bandes passantes des catégories 3 et 5 sont respectivement de 16 Mhz et 199 Mhz).

3.2 Les supports optiques

C'est une fine lame de verre ultra-pure. Elle utilise les vibrations lumineuses pour transmettre les informations.

Constitution : Un câble à fibre optique est semblable à un coaxial sans tresse métallique : au centre, se trouve le cœur en verre à travers lequel la lumière est propagée. Le cœur est entouré d'une gaine de verre dont l'indice de réfraction est inférieur à celui du cœur pour empêcher le rayon lumineux de quitter celui-ci. La gaine est protégée par un revêtement en plastique. Un système de transmission optique comporte 3 composants principaux (voir figure 2.8) :

- Un **émetteur** (source) de lumière qui peut être :
 - Une **diode électroluminescente (LED Light Emitting Diode)**, diode qui fonctionne dans le rouge visible (850nm). C'est ce qui est utilisé pour le standard Ethernet **FOIRL**.
 - Les **diodes à infrarouge** qui émettent dans l'invisible à 1300nm.
 - Les **lasers**, utilisés pour la fibre monomode, dont la longueur d'onde est 1300 ou 1550nm.
- Un **guide cylindrique** qui n'est autre qu'une fibre en verre ultrafine, la fibre optique de 100 à 300 microns de diamètre, recouverte d'un isolant.
- Un **récepteur** (détecteur) de lumière qui peut être :
 - Une **photo diode**.
 - Un **phototransistor**.

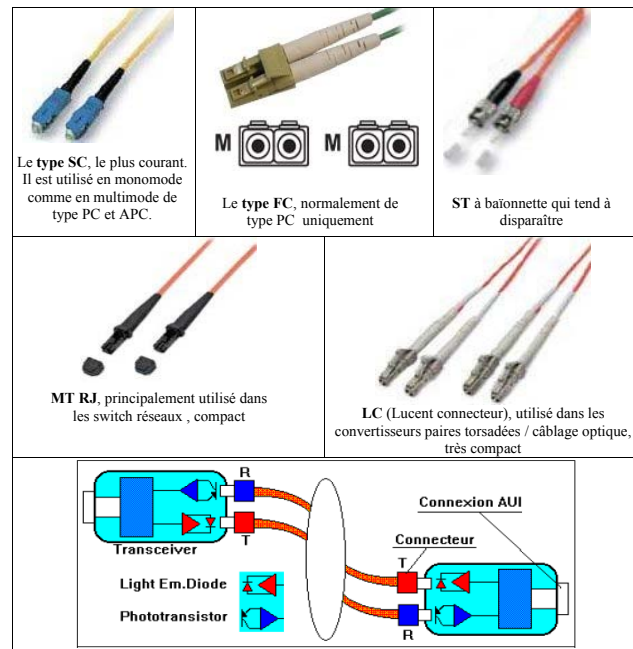


Figure 2.8 : Connecteurs pour fibre optique.

♦ Fonctionnement

Par convention, une impulsion de lumière indique un bit à 1 et l'absence de lumière, un bit à 0. Lorsque le récepteur reçoit de la lumière, il génère une impulsion électrique. En reliant à une fibre optique d'un côté une source de lumière, et de l'autre un récepteur, on a un système de transmission de données unidirectionnel pouvant accepter un signal électrique, le convertir et le transmettre sous forme d'un signal lumineux, lequel est reconverti à l'autre extrémité en un signal électrique. Lorsqu'un rayon de lumière passe d'un média à un autre (par exemple du verre de silice à l'air), le rayon est *réfracté* c'est-à-dire dévié dans le nouveau milieu par rapport à sa direction initiale. Une fibre dont les rayons se propagent sous différents angles dans la fibre est dite *fibre Multimode* (chaque rayon a un mode différent). Si le diamètre de la fibre est réduit dans des proportions telles qu'un seul rayon lumineux puisse s'y propager, la fibre est dite *monomode*, puisque la lumière ne peut se propager qu'en ligne directe sans réflexion.

♦ Types

Deux types de fibres optiques en découlent (voir figure 2.9):

- La **monomode** : elle utilise un seul canal de transfert à l'intérieur du conducteur. Son cœur est si fin que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement direct. La dispersion nodale devient quasiment nulle. Le cheminement du rayon optique est linéaire avec pratiquement aucune dispersion du signal. La bande passante transmise est presque infinie ($> 10\text{GHz/km}$), permettant de transmettre des données à 50Gbits/s sur 100kms sans amplification. Les performances atteignent les 100 GB/s au kilomètre. Le petit diamètre du cœur (10 μm) nécessite une grande puissance lors de l'émission. Cette opération est réalisée par des diodes (source) au laser qui sont relativement onéreuses. Elle est réservée aux réseaux WAN (longues distances).
- La **multimode** : elle utilise un cœur plus large, l'émetteur est une simple diode LED. Elle est donc moins chère. Dans ce type de fibre, les rayons peuvent suivre différents trajets suivant l'angle de réfraction, et donc différents temps de propagation. Les données doivent être reconstituées à l'arrivée. Si les performances atteignent les Gb/s, elles ne peuvent être utilisées que sur des courtes distances (en LANs). On en trouve :
 - La **fibre à saut d'indice 200/380** : Cette fibre provoque une grande dispersion des signaux la traversant, ce qui génère une déformation du signal reçu.
 - La **fibre à gradient** : Son cœur est constitué de couches de verre successives ayant un indice de réfraction proche. La bande passante typique est de 200-1500 Mhz au km. C'est ce type de fibre qui est utilisé à l'intérieur des bâtiments de l'Université (62.5/125) et entre certains sites desservis par les PTT (50/125).

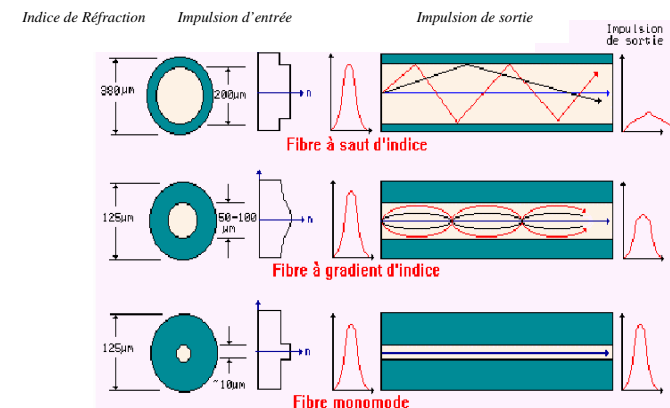


Figure 2.9 : Propagation de la lumière dans la fibre optique

Ces câbles ne peuvent en aucun cas être pliés (rupture du signal). La connexion des connecteurs de branchement aux deux extrémités doivent particulièrement être soignés. Les réseaux Ethernet 100 Base FX, 1000 FX, 1000 Base LX, 1000 Base SX utilisent la fibre multimode. Les réseaux 1000 Base LX (jusqu'à 70 kms) et 1000 Base LH utilisent le monomode. Deux câblages en fibre sont utilisés pour permettre le full duplex dans les réseaux Ethernet. Comme décrit en **figure II.8**, différents connecteurs sont utilisés :

La fibre optique présente de très bonnes performances. La technologie actuelle des fibres permet d'envisager une bande passante dépassant largement 50000 Gbits/s (50 Tbits/s). Néanmoins, son coût reste très élevé et son installation est délicate. Le câblage optique est particulièrement adapté à la liaison entre répartiteurs (liaison centrale entre plusieurs bâtiments, appelé *backbone*), car elle permet des connexions sur de longues distances (de quelques kilomètres à 60 kms dans le cas du type *fibre monomode*) sans nécessiter de mise à la masse. De plus, ce type de câble est très sûr, car il est extrêmement difficile de mettre un tel câble sur écoute. La fibre optique est un câble possédant de nombreux avantages :

- Très grande bande passante : 1Ghz pour 1 Km. La bande passante autorise des débits de plusieurs Gbits/s.
- Faible volume.
- Grande légèreté (quelques grammes par Km).
- Très faible atténuation (régénération >10 Km) (voire 50 km avec 0,85 micron).
- Très bonne qualité de transmission.
- Résistance au chaud et au froid.
- Pas de rayonnement (protection en cas d'application militaire).

Cependant, on peut énumérer quelques inconvénients à l'utilisation de la fibre optique :

- Difficulté de raccordement entre 2 fibres.
- Dérivations difficiles.
- Difficultés sur le multiplexage de l'onde.

3.3 Les supports aériens (sans fil)

Dans ce type de transmission, le support de transmission est immatériel (pas de support physique entre deux extrémités du réseau). Les supports utilisés sont l'air ou le vide. Ils permettent la circulation d'ondes électromagnétiques ou radioélectriques diverses. On retrouve dans cette catégorie les transmissions:

• **Par faisceaux hertziens** : Un *faisceau hertzien* est un système de transmission de signaux (aujourd'hui principalement numériques), mono-directionnelle ou bilatérale et généralement permanente, entre deux sites géographiques fixes. Il exploite pour la transmission le support d'ondes radioélectriques, par des fréquences porteuses allant de 1 GHz à 40 GHz, focalisées et concentrées grâce à des *antennes directives*. On trouve par exemple les faisceaux hertziens pour la transmission radio, TV. Les faisceaux hertziens sont sensibles aux perturbations atmosphériques.

• **Par rayons infrarouges ou par rayons lasers** : cas particulier des faisceaux hertziens utilisés pour interconnecter des réseaux privés sur de courtes distances (avoisinant 100m). On utilise aussi ces rayons lorsqu'on n'a pas la possibilité d'établir une liaison par fibre optique ou ligne téléphonique dédiée et que l'on souhaite relier entre des bâtiments dotés de réseaux LAN.

• **Par satellites de télécommunications (rayons radio électromagnétiques)** : Les liaisons hertziennes sont difficilement utilisables pour les longues distances, car cela nécessite des

relais ; d'où l'utilisation des satellites. Un satellite comporte plusieurs répéteurs ou transpondeurs ; chacun reçoit un signal dans une bande de fréquence donnée et le ré-amplifie puis le retransmet dans une autre bande de fréquence.

3.4 Synthèse

Le **tableau 2.2** synthétise les performances des différents supports de transmission.

Support de transmission		Caractéristique
fil métallique		100 Mbits/s (courte distance)
câble coaxial		haut débit (réseaux locaux)
fibre optique		supérieur à 100 Mbits/s
transmission par onde	antenne hertzienne	10 Mbits/s
	antenne infrarouge	
	satellite	
	géostationnaire	

Tableau 2.2 : Synthèse

4. Les modes de Transmission de données

La transmission de données entre deux machines peut s'effectuer de différentes manières. Elle est caractérisée par :

- Le sens des échanges.
- Le mode de transmission : il s'agit du nombre de bit envoyés simultanément.
- La synchronisation entre émetteur et récepteur.

4.1 Le sens des échanges

Trois types de liaisons sont possibles selon le sens utilisé pour l'échange.

• **Liaison Simplexe** : Elle caractérise une liaison dans laquelle les données circulent dans un seul sens, c'est à dire de l'émetteur vers le récepteur. Ce mode est très utile lorsque les données n'ont pas besoin de circuler dans les deux sens (par exemple de votre ordinateur vers l'imprimante ou de la souris vers l'ordinateur ...).

• **Liaison Half Duplex** : caractérise une liaison dans laquelle les données circulent dans un sens ou l'autre, mais pas les deux simultanément. Ainsi, avec ce genre de liaison, chaque extrémité de la liaison émet à son tour. Ce type de liaison permet d'avoir une liaison bidirectionnelle utilisant la capacité totale de la ligne.

• **Liaison Full Duplex** : caractérise une liaison dans laquelle les données circulent de façon bidirectionnelle et simultanément. Ainsi, chaque extrémité de la ligne peut émettre et recevoir en même temps. Ce qui signifie que la bande passante est divisé par deux pour chaque sens d'émission des données si un même support est utilisé pour les transmissions.

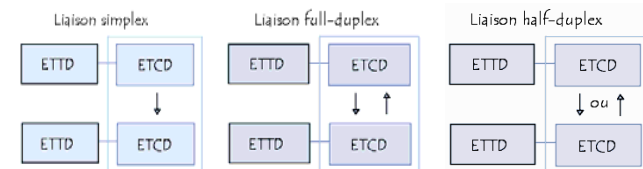


Figure 2.10 : Sens des échanges.

4.2 Modes de transmission

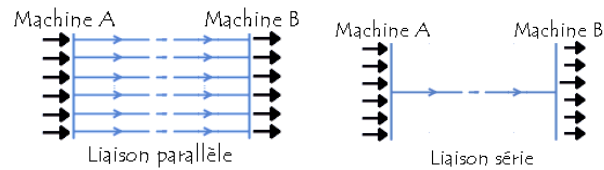


Figure 2.11 : Modes de transmission

Le mode de transmission désigne le nombre d'unités d'informations (bits) pouvant être simultanément transmis par le canal de communication. En effet, un processeur (donc l'ordinateur en général) ne traite jamais (dans le cas des processeurs récents) un seul bit à la fois. Il permet généralement d'en traiter plusieurs (la plupart du temps 8, soit un octet), c'est la raison pour laquelle la liaison de base sur un ordinateur est une liaison parallèle.

♦ Liaison parallèle

On désigne par liaison *parallèle* la transmission simultanée de N bits. Ces bits sont envoyés simultanément sur N voies différentes (la liaison parallèle nécessite généralement 10 fils). Ces voies peuvent être :

- N lignes physiques : auquel cas chaque bit est envoyé sur une ligne physique (c'est la raison pour laquelle les câbles parallèles sont composés de plusieurs fils en nappe).
- Une ligne physique divisée en plusieurs sous-canaux par division de la bande passante. Ainsi, chaque bit est transmis sur une fréquence différente.

Etant donné que les fils conducteurs sont proches sur une nappe, des perturbations (notamment à haut débit), peuvent être générées dégradant ainsi la qualité du signal.

♦ Liaison série

Dans une liaison en série, les données sont envoyées bit par bit sur la voie de transmission. Toutefois, étant donné que la plupart des processeurs traitent les informations de façon parallèle, il s'agit de transformer des données arrivant de façon parallèle en données en série au niveau de l'émetteur, et inversement au niveau du récepteur. Ces opérations sont réalisées grâce à un contrôleur de communication (la plupart du temps une puce *UART*, *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*). Le contrôleur de communication fonctionne de la façon suivante :

- **La transformation parallèle-série** se fait grâce à un registre de décalage. Le registre de décalage permet, grâce à une horloge, de décaler le registre (l'ensemble des données présentes en parallèle), d'une position à droite, puis d'émettre le bit de poids fort (celui le plus à gauche) et ainsi de suite.
- **La transformation série-parallèle** se fait quasiment de la même façon grâce au registre de décalage qui se décale d'une position à droite à chaque réception d'un bit, puis d'émettre la totalité du registre en parallèle lorsque celui-ci est plein et ainsi de suite.

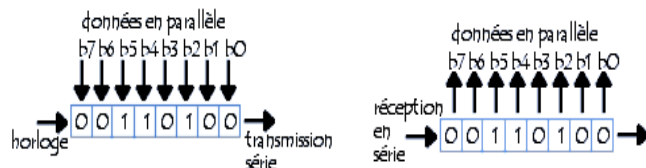


Figure 2.12 : Sériailisation et parallélisation des données.

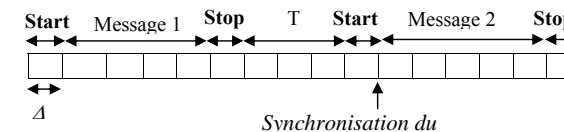
Remarque

Si la liaison parallèle est plus rapide, elle est également plus chère (plus de fils), plus encombrante et très mauvaise sur les longues distances. Le déphasage entre les différents signaux du même câble entraîne souvent une désynchronisation. C'est pour cette raison que les câbles d'imprimante dépassent rarement les 1m50. La transmission série est donc utilisée pour les longues distances (supérieures à quelques mètres).

4.3 Modes de Synchronisation

Une séquence de bits transmis correspond à une suite de changements d'état du signal ; chaque état ne durant qu'un laps de temps très court. La fonction de synchronisation sur une voie de communication a pour but d'assurer un prélèvement de l'information par le récepteur aux instants où le signal est significatif. Le récepteur doit être synchronisé pour que le début et la fin des instants de prélèvements de l'info correspondent aux changements d'état : c'est la *synchronisation bit*. Dès que le récepteur reçoit bien les bits d'information, il doit encore reconnaître le début et la fin de chaque caractère ou **Bloc** : c'est la *synchronisation-caractère ou Bloc*. On distingue alors deux types de transmission : la transmission *asynchrone* et la transmission *synchrone*.

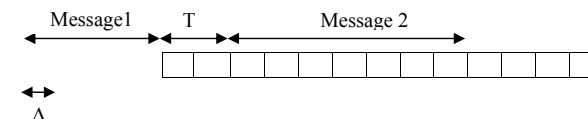
- **Transmission asynchrone** : Chaque caractère est émis de façon irrégulière dans le temps (exemple : caractères saisis au clavier). L'intervalle de temps entre l'envoi de deux caractères est quelconque. Il n'y a synchronisation entre l'émetteur et le récepteur que pendant la transmission de chaque caractère. Il est donc nécessaire d'ajouter une information indiquant le début de la transmission du caractère (appelée *bit START*) et l'envoi d'une information de fin de transmission du caractère (un ou plusieurs bits *STOP*).



Δ : Temps nécessaire pour l'envoi d'un bit

T : Temps *quelconque* entre l'envoi du message 1 et du message 2 (multiple de Δ).

- **Transmission synchrone** : Les bits de l'information sont émis de façon régulière, sans séparation entre les caractères successifs. Pour cela, le récepteur possède une horloge bit de même fréquence que celle de l'émetteur. La synchronisation caractère est réalisée par la reconnaissance de séquences particulières de bits/ou par l'insertion régulière d'éléments de synchronisation en cours de la transmission.



Remarque

Les liaisons synchrones sont utilisées en téléinformatique pour transporter des messages à des vitesses importantes.

5. Multiplexage des données

Lorsqu'un signal à spectre étroit est transmis sur un support à large bande passante, il y a une mauvaise utilisation du support de transmission. Par ailleurs, lorsque plusieurs liaisons sont nécessaires entre deux sites, il est généralement plus économique d'utiliser une seule ligne partagée sur laquelle seront transmis les messages de différents équipements, plutôt que de réaliser des liaisons point à point. Pour optimiser l'usage des canaux de transmission, les opérateurs ont développé des techniques qui regroupent plusieurs communications sur un même support de transmission. On parle alors de *partage de canal*. Ceci a été possible puisque les coûts d'installation et d'entretien d'une ligne à haute vitesse (débit) et ceux d'une ligne locale à faible débit sont équivalents.

Par conséquent, lorsque plusieurs circuits de données existent, il est intéressant de concentrer les données transmises sur des lignes secondaires appelées *voies basse vitesse (BV)* sur un seul circuit de donnée à plus fort débit (dit *voie Haute Vitesse, HV*). *Multiplexeurs* et *concentrateurs* réalisent cette opération. Le partage de canal peut être réalisé suivant deux types d'allocation :

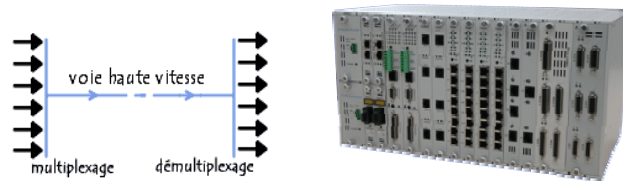
♦ L'allocation statique

Lorsqu'une fraction de la capacité de transmission de la ligne est mise de façon permanente à la disposition de chaque voie ou canal de transmission.

♦ L'allocation dynamique

Lorsque les durées d'allocation sont variables suivant le trafic de chaque voie.

Le partage statique met en œuvre des équipements de type multiplexeur. Le partage dynamique peut être réalisé à l'aide d'équipements spécialisés de type *concentrateurs*.



Principe de Multiplexeur /Démultiplexeur

Figure 2.13 : Multiplexage et Multiplexeurs

Le *multiplexage* consiste donc à faire transiter sur une seule et même ligne de liaison, dite *voie haute vitesse*, des communications appartenant à plusieurs paires d'équipements émetteurs et récepteurs, (sans mélanger l'information à la sortie). Chaque émetteur (resp. Récepteur) est raccordé à un *multiplexeur* (resp. *démultiplexeur*) par une liaison dite *voie basse vitesse*. On appelle *multiplexeur* l'équipement de multiplexage permettant de combiner les signaux provenant des émetteurs pour les faire transiter sur la *voie haute vitesse*. On nomme *démultiplexeur* l'équipement de multiplexage sur lequel les récepteurs sont raccordés à la *voie haute vitesse*. Plusieurs techniques de multiplexage sont possibles :

5.1 Le multiplexage fréquentiel

Appelé aussi *MRF (Multiplexage par répartition de fréquence* ou en anglais *FDM, Frequency Division Multiplexing*), permet de partager la bande de fréquences disponibles sur la voie haute vitesse en une série de canaux de plus faible largeur (bandes plus étroites), afin de faire circuler en permanence sur la voie haute vitesse les signaux provenant des différentes voies basse vitesse. Le principe suivi lorsque plusieurs canaux sont multiplexés, est de transposer les niveaux de fréquences

de chaque canal dans la bande impartie : elles sont augmentées d'une valeur différente pour chaque canal. Il est alors possible de combiner les sous-canaux ainsi formés puisqu'ils n'exploitent pas de plages de fréquences identiques.

Ce procédé est notamment utilisé sur les lignes téléphoniques afin d'en accroître le débit, en s'assurant qu'aucune bande passante de voie basse vitesse ne se chevauche. Le multiplexeur prend chaque signal de voie basse vitesse et le remet sur la voie haute vitesse dans la plage de fréquences prévues. Ainsi, plusieurs transmissions peuvent être faites simultanément, chacune sur une bande de fréquences particulières, et à l'arrivée, le *Démultiplexeur* est capable de discriminer chaque signal de la voie haute vitesse pour l'aiguiller sur la bonne voie basse vitesse.

La voie *HV* doit avoir une capacité suffisante pour absorber toutes les données provenant des voies *BV*. Chaque voie *BV* conserve sa bande passante sur la voie *HV*. Soit BP la bande passante de la voie haute vitesse et Bp_i est la bande passante à la ligne basse vitesse (i). On a : $\sum Bp_i \leq BP$. Ainsi, si C est la capacité de la ligne composite et D_i le débit du i ème terminal (ligne basse vitesse), alors : $C \geq \sum D_i$ et la rapidité de modulation du multiplexeur est : $R_{Mux} = \sum R_i$.

Toute personne possédant un appareil de radio ou de télévision est familière avec ce type de multiplexage puisque l'antenne reçoit en même temps plusieurs signaux, chacun modulé avec une porteuse unique. Il s'agit alors de sélectionner le canal désiré en ajustant le récepteur à la porteuse du canal choisi. Le principe général du *FDM* est illustré à la *figure 2.14*.

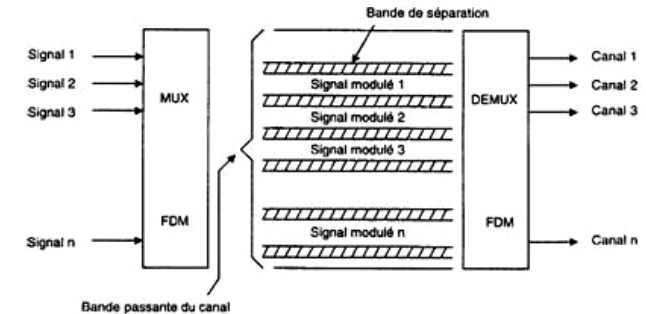


Figure 2.14 : Principe du Multiplexage fréquentiel

Remarque

Le *multiplexage fréquentiel* est uniquement possible avec la transmission analogique. Fourier a démontré grâce à sa transformée la possibilité de retrouver des signaux analogiques sinusoïdaux à partir d'une somme de signaux. Ceci n'est pas réalisable avec un signal numérique.

Le multiplexage fréquentiel est aussi utilisé en téléphonie où, chaque signal occupe une bande de fréquence de 4kHz. Les supports de transmission employés pour acheminer ces signaux (fils, câbles, radio, satellites, etc.) possèdent des bandes passantes beaucoup plus larges. Le système téléphonique utilise le principe du multiplexage en fréquence pour transmettre simultanément plusieurs signaux. Une hiérarchie *FDM* téléphonique a été définie pour transmettre jusqu'à 600 voies téléphoniques multiplexées sur les supports comme des fils torsadés ou des câbles coaxiaux (voir *figure 2.15*).

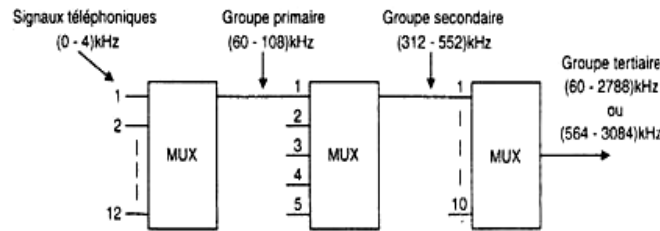


Figure 2.15 : Hiérarchie FDM

Le premier niveau de multiplexage regroupe 12 canaux en utilisant 12 porteuses différentes afin de générer 12 signaux qui seront regroupés (multiplexés), pour former le *groupe primaire*. Il faut noter que la différence entre deux porteuses adjacentes est de 4 kHz. Le *groupe secondaire* (super group) est constitué de 5 *groupes primaires* et peut donc véhiculer 60 voies téléphoniques. Le *groupe tertiaire* (Master group) est composé de 10 groupes secondaires et véhicule 600 voies téléphoniques.

5.2 Le multiplexage temporel

Le multiplexage temporel, appelé aussi *MRT* (Multiplexage par répartition dans le temps ou en anglais *TDM, Time Division Multiplexing*) permet d'échantillonner les signaux des différentes voies basse vitesse et de les transmettre successivement sur la voie haute vitesse en leur allouant la totalité de la bande passante pendant un laps de temps limité appelé *quantum*.

Plus moderne et mieux adaptée à la transmission numérique, cette technique permet de transmettre à grande vitesse plusieurs signaux numériques en série sur un seul canal de transmission. Suivant les techniques, chaque intervalle de temps attribué à une voie lui permettra de transmettre 1 ou plusieurs bits. En fait, le *débit effectif* est inférieur au débit théorique de la ligne de transmission, divisé par le nombre de transmissions en parallèle (en raison des voies muettes). Une trame du multiplexeur peut être formée en regroupant les bits venant de chaque canal (*figure 2.16a*), ou les caractères individuellement (*figure 2.16b*), si la portion de temps allouée à chaque canal est suffisamment large.

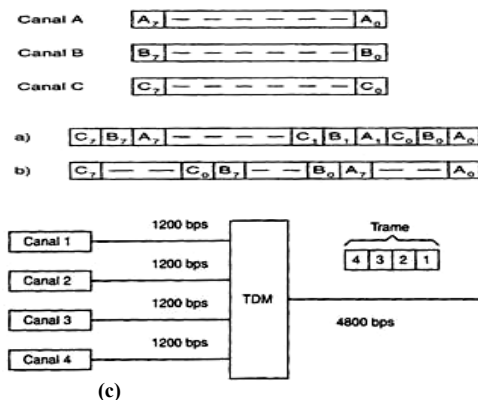


Figure 2.16 : Formation d'une trame:
a) par bits, b) par caractères

Tel que montré par la *figure 2.16c*, le système TDM illustré multiplexe quatre (4) signaux numériques. Si chacun des canaux transmet à 1200 bps à la sortie du multiplexeur, la vitesse minimale de transmission doit être égale à 4800 bps. Deux techniques de multiplexage sont utilisées :

• Multiplexage temporel synchrone

Les quotas sont égaux et alloués périodiquement à chaque équipement. Ce qui implique un adressage implicite et l'existence d'une mémoire dédiée (Buffer) à chaque ligne ou ETDT pour le stockage de l'information en attente de transfert.

• Multiplexage temporel asynchrone

Dès qu'un buffer est plein, la donnée stockée est automatiquement envoyée. Cela nécessite de rajouter l'adresse de la provenance. Cette technique permet de réduire les silences sur la ligne composite. Elle améliore le multiplexage temporel synchrone en n'attribuant la voie haute vitesse qu'aux voies basses vitesses qui ont effectivement des données à transmettre. Les tranches de temps sont donc dynamiquement allouées.

Remarque

La vitesse de transmission des voies basse vitesse, notée d , est fonction de la vitesse de transmission de la ligne composite, notée D , et du nombre de voies n : $d=D/n$. La période de scrutation T_s des trames est fonction du nombre de voies et de l'intervalle de temps élémentaires (*Quantum*) Q : $T_s = n \times Q$.

Exemple : Soit trois terminaux T_1, T_2, T_3 reliés à un multiplexeur temporel synchrone.

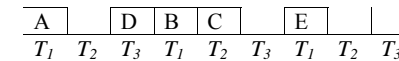
T_1 émet le message A

T_3 émet le message D

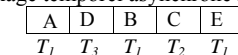
T_1 émet le message B

T_2 émet le message C

T_1 émet le message E



Dans le cas d'un multiplexage temporel asynchrone nous aurons cette allocation :



5.3 Le multiplexage statistique (STDM)

Ce multiplexeur a donc pour rôle de :

- Détecter les tampons non vides.
- Prélever les données mémorisées en supprimant les bits non Significatifs (comme STOP et START dans une transmission asynchrone).
- Compresser éventuellement les données.
- Les insérer dans les trames de la voie composite.

En ne transmettant pas les silences des voies basses, cette technique implantée dans des *concentrateurs* améliore grandement le débit global des transmissions. Mais, elle fait appel à des protocoles de plus haut niveau et est basée sur des moyennes statistiques des débits de chaque ligne basse vitesse. Le nom de ce type de multiplexage provient du fait que les multiplexeurs se basent sur des statistiques concernant le débit de chaque ligne basse vitesse. Ainsi, la ligne haute vitesse ne transmettant pas les *blancs*, les performances sont meilleures qu'avec un multiplexage temporel. Cette allocation dynamique de temps accroît l'efficacité du canal de transmission par un facteur de 10 environ, lui permettant de transmettre à un taux plus faible que le taux nécessaire à multiplexer le même nombre de canaux par un système *TDM*; ou de desservir un plus grand nombre d'équipements en transmettant à la même vitesse que l'autre.

Évidemment, une portion de temps doit être réservée pour l'adresse du port et les données de contrôle, mais ce dernier temps reste de loin plus petit que celui réservé à un canal inactif. Le temps alloué à l'information venant de chaque canal est variable, permettant si nécessaire de servir plus longtemps le terminal transmettant plus d'information. Il est évident que toutes les versions du *STDM* requièrent des mémoires tampons (buffers).

5.4 Concentration et diffusion

La *concentration* consiste en la réception d'informations sur plusieurs lignes pour remettre l'ensemble sur une seule (la ligne est partagée dans le temps). La *diffusion* est l'opération inverse. Un concentrateur est un multiplexeur asynchrone temporel intelligent, permettant d'assurer les fonctions de concentration et de diffusion. Il alloue dynamiquement (à la demande) les tranches de temps aux ETTD qui ont en besoin. Pour cela, il doit assurer le stockage des données temporairement sur des mémoires avant leur émission. Les blocs de données doivent explicitement contenir des informations de l'expéditeur. Le concentrateur doit être capable de désynchroniser le traitement des différentes lignes qu'il multiplexe.

De manière générale, les avantages des multiplexeurs peuvent être énumérés comme suit :

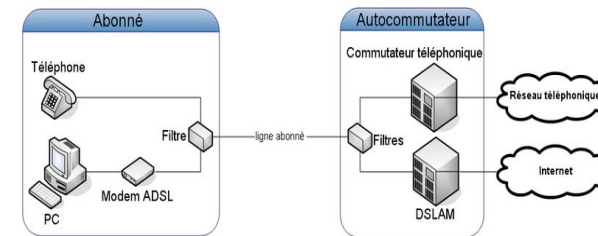
- Ils s'adaptent aux vitesses et aux types des ETTD.
- Ils peuvent détecter les erreurs et les corriger.
- Ils peuvent translater des codes, compacter et crypter les données.
- Ils peuvent collecter les statistiques sur le trafic.

6. ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

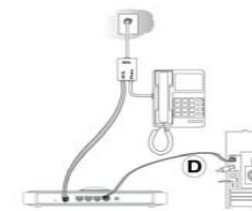
L'*Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)* est une technique de communication qui permet d'utiliser une ligne téléphonique pour transmettre et recevoir des données numériques de manière indépendante du service téléphonique (contrairement aux modems dits *analogiques*).

Cette technologie est massivement mise en œuvre par les fournisseurs d'accès à Internet pour le support des accès dits « haut-débit ». Le sigle anglais ADSL se traduit fonctionnellement par « liaison numérique à débit asymétrique sur une ligne d'abonné ».

Comme son nom l'indique, la technologie ADSL implique un débit asymétrique, c'est-à-dire que le débit est plus important dans un sens de transmission que dans l'autre, au contraire de la technologie SDSL pour laquelle le débit est symétrique. Pour le particulier, cela se traduit pour l'ADSL par un débit montant (*upload*) plus faible que le débit descendant (*download*), généralement d'un facteur de l'ordre de 5 à 20. La ligne téléphonique qui relie le domicile d'un abonné au central téléphonique est constituée d'une paire de fils de cuivre, en général continue entre ces deux points (la *boucle locale*). Les signaux utilisés pour la téléphonie classique (sonnerie, numérotation multifréquences, voix) occupent une bande de fréquences qui s'étend entre 25 et 3 400 Hz environ. Le principe de l'ADSL consiste à exploiter une autre bande de fréquence, située au-dessus de celle utilisée pour la téléphonie, pour échanger des données numériques en parallèle avec une éventuelle conversation téléphonique. Grâce à cette séparation dans le domaine fréquentiel, les signaux ADSL qui transportent les données et les signaux téléphoniques qui transportent la voix circulent donc simultanément sur la même ligne d'abonné sans interférer les uns avec les autres.



Architecture d'un système ADSL



Raccordement chez l'abonné



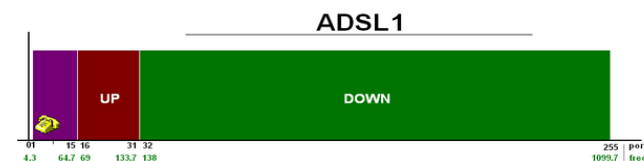
Routeur WIFI ADSL



DSLAM



Filtre ADSL



Spectre des fréquences dans une ligne ADSL

Figure 2.17 : Principe de fonctionnement de l'ADSL

Le signal ADSL transite sur la paire cuivrée téléphonique au même titre que le signal téléphonique, et la cohabitation de ces deux types de signaux requiert l'installation de *filtres* destinés à séparer les fréquences respectives des deux flux. Au niveau de l'autocommutateur public, ces filtres sont installés sous la forme d'armoires de filtrage qui regroupent plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de cartes électroniques de filtrage. Chez l'abonné, la séparation des deux flux est réalisée au moyen d'un filtre ADSL placé entre la prise téléphonique et la fiche de connexion du téléphone. Le signal à destination de l'ordinateur, arrive au modem lequel extrait les données numériques du signal ADSL. Ces données sont ensuite transmises à l'ordinateur, par l'intermédiaire d'un câble Ethernet, d'un câble USB ou encore grâce à une liaison WiFi. Les données numériques véhiculées par l'ADSL peuvent

L'ADSL fait partie d'une famille de technologies semblables, regroupées sous le terme générique DSL ou xDSL. Les différents membres de cette famille se différencient par leur nature symétrique ou asymétrique, les débits offerts, les longueurs de ligne compatibles avec une qualité de service déterminée, etc. L'ADSL nécessite l'installation d'équipements de communication dédiés à cette technologie aux deux extrémités de la ligne téléphonique. Dans les locaux de l'autocommutateur public, l'équipement qui traite les signaux ADSL d'un groupe d'abonnés s'appelle un DSLAM (pour *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*). Chez l'abonné, l'équipement qui effectue la même fonction est soit un modem ADSL, soit un routeur ADSL (qui n'est autre qu'un routeur classique muni d'un modem ADSL interne). L'ADSL utilise un spectre de fréquences étendu sur un support physique qui n'était pas prévu pour cela à l'origine. Cette technologie peut donc se révéler inexploitable sur des lignes d'abonnés qui présentent une trop forte atténuation pour les signaux de l'ADSL lorsque par exemple la longueur de la ligne est trop importante.

elles-mêmes servir de support à une communication téléphonique VoIP, ou à la diffusion de programmes de télévision numérique.

6.1 Répartition des sous-porteuses entre sens montant et sens descendant

L'ADSL est considéré par les instances de normalisation comme une technologie destinée essentiellement aux particuliers et aux petites et moyennes entreprises. Vis-à-vis des ressources disponibles sur Internet, cette catégorie de clients est en général davantage amenée à télécharger des informations qu'à envoyer des informations vers un site distant. Il a donc été décidé de favoriser le sens de la communication qui va du réseau vers l'abonné (*downstream* en anglais), au détriment du sens qui va de l'abonné vers le réseau (*upstream* en anglais). C'est pour cela que l'ADSL est qualifié d'*asymétrie*. Une ligne ADSL normale utilise une bande de fréquences de 1099 KHz. Cette bande est subdivisée en 256 canaux dont la largeur de bande est égale à 4,3 KHz. Le nombre de canaux affectés au sens descendant est plus élevé que le nombre de canaux affectés au sens montant. Quand l'ADSL est mis en œuvre sur une ligne téléphonique classique (analogique), les canaux 16 à 31 sont affectés au trafic émis de l'abonné vers le réseau. Les sous-canaux 33 à 255, quant à elles, sont affectés au trafic reçu du réseau par l'abonné. En fonction de l'abonnement souscrit (on parle de « paliers de débit »), le débit peut être volontairement limité par les équipements du fournisseur d'accès à Internet, indépendamment des possibilités techniques. Par ailleurs, les modems ADSL maintiennent en permanence des statistiques sur la qualité de réception, qui est mesurée sur chaque canal. Cette évaluation est faite au démarrage de la communication ADSL (phase de synchronisation) par l'intermédiaire de données de test émises sur chaque sous-porteuse (signal d'un canal), et par l'échange d'informations entre les deux modems sur la qualité du signal reçu. Par la suite, les variations du rapport signal-sur-bruit de chaque sous-porteuse, représentatives de la qualité de réception, sont surveillées individuellement. Lorsqu'une sous-porteuse est affectée par des perturbations, le modem et l'équipement distant ont la possibilité d'échanger des requêtes qui leur permettent d'augmenter la puissance d'émission dévolue à cette sous-porteuse ou de réduire le nombre de bits transmis sur celle-ci, et de transférer la différence sur une sous-porteuse qui bénéficie de meilleures conditions de réception. Ce mécanisme est connu sous le nom de *bitswap* en anglais, et fonctionne de manière indépendante dans le sens montant et dans le sens descendant.

6.2 Problèmes de transmission

L'ADSL peut parfois se révéler délicat à mettre en œuvre sur certaines lignes d'abonné. La bande de fréquences utilisée par les sous-porteuses de l'ADSL couvre en effet à peu près le domaine des fréquences radio correspondant aux « grandes ondes » et aux « ondes moyennes ». Tous ceux qui ont eu un jour la curiosité d'écouter ces gammes d'émission, de plus en plus délaissées au profit de la modulation de fréquence, ont pu constater que la réception est en général de qualité médiocre, avec des variations de signal parfois importantes, et des craquements et sifflements qui résultent des perturbations extérieures. De ce point de vue, une communication ADSL peut être considérée comme une « transmission radio ondes moyennes sur ligne téléphonique » et elle est donc sujette aux mêmes distorsions et perturbations. En fonction du trajet emprunté par une ligne d'abonné entre le domicile et l'autocommutateur public, il n'est donc pas rare que des perturbations ponctuelles ou permanentes affectent les signaux ADSL. Si elles sont d'une nature continue (bruit blanc), ces perturbations sont détectées et évaluées par les équipements ADSL au moment de la synchronisation, et les sous-porteuses correspondantes sont délaissées au profit de sous-porteuses plus fiables. Mais les perturbations les plus gênantes pour les communications ADSL sont celles que l'on classe dans la catégorie du « *bruit impulsif* », car elles sont trop rapides pour être prises en compte efficacement par le dispositif de redistribution des données entre les sous-porteuses. Ce type de perturbation résulte en général d'un défaut d'antiparasitage d'un dispositif électrique : moteur de deux-roues, moteur électrique de lave-linge, pompe de chaudière, four à micro-ondes, néon défectueux... Mais il existe parfois des causes plus inattendues : une pluie d'orage sur une ligne téléphonique aérienne entraîne

également ce type de perturbation du fait de la charge électrique accumulée par les gouttes de pluie. D'autres perturbations peuvent être provoquées par une ligne téléphonique adjacente qui fonctionne dans des conditions anormales, par un mauvais fonctionnement de l'éclairage public des rues, ou encore par un filtre défectueux au niveau de l'armoire de brassage située dans le bâtiment de l'autocommutateur public.

Ces perturbations peuvent affecter la communication *en tout point du trajet physique* de la ligne d'abonné, et être suffisamment gênantes pour entraîner des pertes de synchronisations répétées, suivies d'autant de tentatives de rétablissement de la connexion. Dans de telles conditions, la communication devient rapidement inexploitable. De ce point de vue, pour un faible pourcentage d'abonnés, l'ADSL reste une technologie dont la fiabilité est aléatoire, et on peut sans doute prédire un succès considérable aux prochaines offres d'abonnement basées sur une transmission optique car cette technologie est remarquablement immune aux perturbations électromagnétiques. Outre un niveau de performances bien supérieur en termes de débit, ces offres devraient donc apporter aux abonnés le niveau de fiabilité qui manque parfois à l'ADSL.

7. Le Multiplexage MIC

Nous avons vu que le multiplexage temporel est utilisé pour la transmission de signaux numériques. Cependant, il est possible de l'utiliser pour des signaux analogiques de type téléphoniques par exemple. Le système s'appelle alors *MIC* (*Modulation par Impulsions codées*). Dans ce système, les informations sont au préalable traitées ou plus précisément *numérisées*. La transmission MIC comporte trois phases principales :

- L'échantillonnage du signal de chaque ligne téléphonique.
- Le codage et la quantification des échantillons.
- Le multiplexage temporel des échantillons numérisés des différentes lignes.

Le système contient un codeur MIC qui transforme le signal analogique de chaque voie en un signal numérique et d'un décodeur qui effectue la conversion inverse. A l'encodage, un filtre limite la bande du signal à 4 kHz tel que prévu par les normes internationales. Le signal analogique restitué dans le circuit de réception à partir du signal numérique est à son tour filtré avant d'être envoyé vers le récepteur de l'appareil téléphonique.

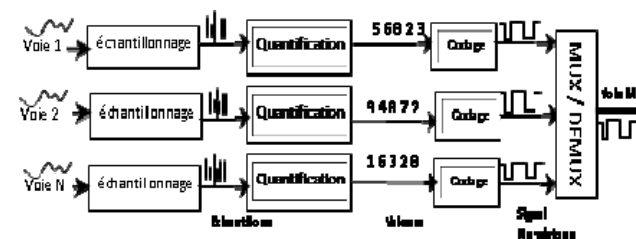


Figure 2.18 : Multiplexage MIC

7.1 Echantillonnage

Un autre aspect à prendre en compte pour la transmission sous forme numérique de signaux analogiques à l'origine, comme la parole, est la nécessité de réaliser au préalable l'*échantillonnage du signal*. Le laps de temps séparant deux échantillons successifs (*période d'échantillonnage*), correspond au temps de transmission de la suite des symboles résultant du codage. L'échantillonnage du signal analogique doit alors respecter la *condition de Shannon*. Cette condition indique que la

reproduction d'un signal occupant une bande de fréquence limitée à $B = f_2 - f_1$, ne peut se faire sans déformation à partir des échantillons reçus que si l'échantillonnage est effectué avec une fréquence au moins égale à $2B$. La bande de fréquence allouée à la téléphonie (voix humaine), étant de 300 à 3400 Hz, la fréquence d'échantillonnage est donc établie à 8 kHz, soit 8000 échantillons par seconde ; d'où une période d'échantillonnage de 125 μ s.

7.2 Quantification et Codage

Les échantillons ainsi obtenus peuvent toutefois mieux être transmis et traités lorsqu'on les convertit en des signaux de forme numérique. Le premier pas à faire pour convertir le signal analogique en un signal numérique est la quantification.

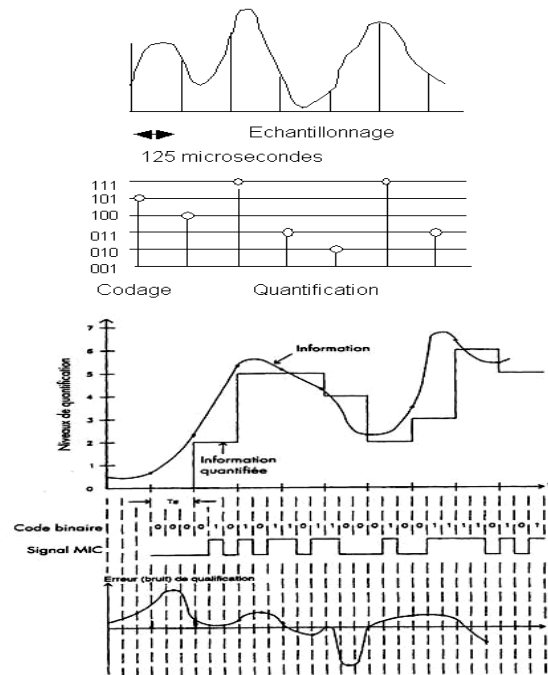


Figure 2.19 : Echantillonnage, quantification et codage d'un signal

Pour ce faire, il y a lieu de diviser toute la gamme des valeurs possibles entre des intervalles de quantification. Pour bien comprendre le principe de la quantification, seuls 8 intervalles de quantification de même grandeur sont représentés sur la **figure 2.19**. Pour chaque échantillon, on détermine l'intervalle de quantification auquel il correspond. À chaque fois, un décalage peut se produire entre la valeur de l'échantillon et le niveau de quantification correspondant. Enfin, l'intervalle de quantification correspondant à un échantillon du signal est converti en un code binaire qui peut être transmis sous forme d'impulsions codées. Le *bruit de quantification* est d'autant plus faible que le nombre d'intervalles de quantification disponibles est plus grand; ce qui signifie un nombre plus grand de bits pour représenter chaque échantillon.

Dans le multiplexage MIC, chaque échantillon est codé sur 8 bits, ce qui autorise 255 niveaux de quantification. Il est donc nécessaire de pouvoir écouler sur la voie téléphonique : $8000 \times 8 = 64000$ bits/s soit 64 kbits/s.

7.3 Multiplexage des signaux

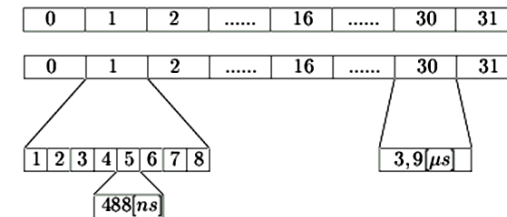


Figure 2.20 : Structure d'une trame MIC

En téléphonie numérique, on utilise une ligne haut-débit capable de multiplexer 32 signaux à 64Kb/s. Le multiplexage de plusieurs voies sur un même support consiste alors naturellement à entrelacer les échantillons numérisés des diverses voies en respectant toujours le même ordre d'émission. Il en résulte un motif répétitif sur la période de 125 μ s appelé *trame*. Les bits composant les échantillons étant généralement transmis en série. Si N est le nombre de voies multiplexées, la durée d'un quantum sera 125 μ s/ N . Ce quantum permet d'envoyer un échantillon (un caractère), avec un débit égal à : $1 / (125 / 32 \times 8) = 2,05$ Mbits/s.

Chaque trame se compose des données de trente deux voies dont deux sont réservées (*voies de service*) :

- La voie 0 : est utilisée comme fanion.
- La voie 16 est utilisée pour le contrôle de la trame et la signalisation.

On dispose donc de trente voies de données effectives. Afin de permettre, à la réception, de déterminer le début de *trame* et de retrouver le cadrage des octets, le premier octet de la trame résulte de la voie 0. Il correspond à un motif caractéristique, appelé *le mot de verrouillage de trame*. Lorsque le signal téléphonique est converti en signal numérique série, il peut être multiplexé en TDM avec d'autres signaux du même type ou des signaux numériques venant de d'autres terminaux. Deux hiérarchies du multiplexage TDM sont présentes en téléphonie: l'une européenne et l'autre nord-américaine. Selon la norme européenne, le premier regroupement consiste à multiplexer 32 canaux (voir **figure.2.21**)

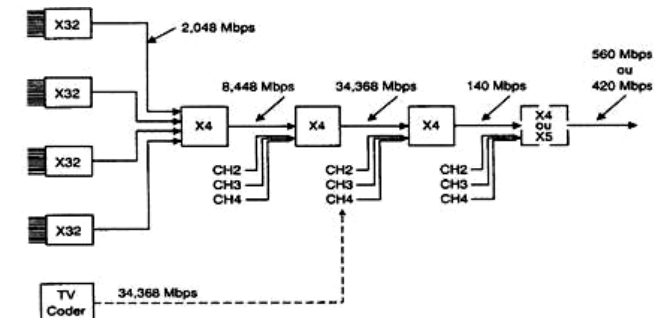


Figure 2.21 : Hiérarchies MIC telle qu'utilisée en Europe et en Afrique

Un tel système permet de grouper 30 voies téléphoniques basse fréquence et la signalisation associée, préalablement numérisées, sur une paire métallique à un débit résultant de 2 048 kbit/s. Les multiplex ainsi créés réalisent le multiplexage de canaux numériques pouvant être affectés selon les débits pourvus :

- Soit de manière fixe à des liaisons permanentes (réseaux spécialisés de données).
- Soit à des circuits téléphoniques avec concentration des voies de parole par affectation dynamique des voies aux divers circuits.

8. Les Réseaux Multiplexés MAN

Le réseau de transmission fournit les capacités de transport des flux voix, vidéo, données générés par les réseaux de commutation : IP, ATM, Frame Relay, RTC, GSM, etc. Trois technologies sont considérées pour la transmission : **PDH** (Plesiochronous Digital Hierarchy), **SDH** (Synchronous Digital Hierarchy) et **D-WDM** (Dense Wavelength Division Multiplexing).

La hiérarchie numérique plésiochrone (PDH) est née au début des années 70 avec la numérisation du téléphone. Elle définissait, entre les points du réseau de l'opérateur, des jonctions Mic à 2 Mbit/s accueillant trente-deux circuits à 64 kbit/s par multiplexage temporel. C'est à partir de ce multiplexage successif des circuits sur plusieurs niveaux que la hiérarchie des débits a été créée en Europe : 2 Mbit/s (E1), 8 Mbit/s (E2), 34 Mbit/s (E3), 140 Mbit/s (E4) et 565 Mbit/s (E5).

Le réseau de transmission existant est constitué pour l'essentiel par juxtaposition de deux technologies (PDH et SDH), sur des supports principalement optiques. Il existe cependant des liens hertziens dans certaines zones géographiques peu adaptées aux conduites enterrées. La structure de ces réseaux est soit du type réseau maillé comme c'est le cas aujourd'hui pour de nombreux réseaux interurbains en Europe, soit du type réseau en anneau, structure qui s'est beaucoup répandue avec la SDH dans les réseaux urbains et régionaux, et dans les réseaux longue distance en Amérique puis en Europe.

Les débits de SDH sont appelés STM-i avec le STM-1 égal à 155 Mbit/s. STM signifie Synchronous Transfer Module. Le STM-4 correspond à un débit de 622 Mbit/s, le STM-16 correspond à un débit de 2,5 Gbit/s et le STM-64 correspond à un débit de 10 Gbit/s. La SDH est concurrencée par Ethernet. En effet, SDH est une technique originellement conçue pour gérer les communications en mode circuit, typiquement les communications téléphoniques. Or, depuis les années 2000, le volume de données de type paquet a supplanté en quantité celui des données de type téléphonique, laissant SDH un peu inadapté aux nouveaux services qu'on lui demande aujourd'hui.

Le multiplexage en longueur d'onde (D-WDM, Dense Wavelength Division Multiplexing) est une technique utilisée en communications optiques qui permet de faire passer plusieurs signaux de longueur d'onde différentes sur une seule fibre optique, en les mélangeant à l'entrée à l'aide d'un multiplexeur (MUX), et en les séparant à la sortie au moyen d'un démultiplexeur (DEMUX).

8.1 PDH

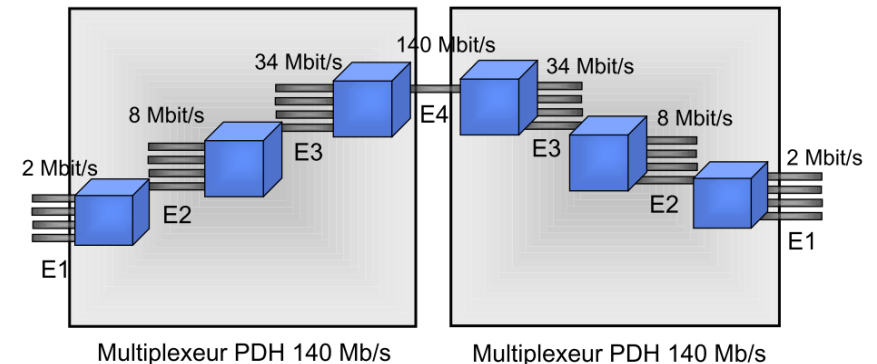
Le transfert de données est basé sur un flux à 2 048 kbit/s. Pour la transmission de la voix, ce flux est séparé en 30 canaux de 64 kbit/s et 2 canaux de 64 kbit/s utilisés pour la signalisation et la synchronisation. On peut également utiliser l'intégralité du flux pour la transmission de donnée dont le protocole s'occupera du contrôle.

Afin d'amener plusieurs flux de 2 Mbit/s d'un point à un autre, ils sont combinés par multiplexage en groupes de quatre. Cette opération consiste à prendre 1 bit du flux #1 suivi d'un bit du #2, puis le #3 et enfin le #4. L'équipement émetteur ajoute également des informations permettant de décoder le flux multiplexé. La combinaison du multiplexage décrit permet un débit de 8 Mbit/s. Des techniques

similaires permettent d'agréger quatre de ces flux pour former des conduits de 34 Mbit/s puis 140 Mbit/s et enfin 565 Mbit/s.

Ces débits en Europe sont nommés Ei avec E1 correspondant à 2 048 kbit/s, E2 correspondant à 8 Mbit/s, E3 correspondant à 34 Mbit/s, E4 correspondant à 140 Mbit/s (le plus haut débit normalisé) et E5 correspondant à 565 Mbit/s mais n'ayant jamais été normalisé. L'utilisation du PDH se limite le plus souvent à 140 Mbit/s après quoi on lui préfère la SDH.

Les débits PDH aux Etats-Unis sont nommés Ti avec T1 à 1,544 Mbit/s, T2 à 6,312 Mbit/s, T3 à 44,736 Mbit/s et T4 fonctionnant à 274,176 Mbit/s.



3 SDH / SONET

Les sigles "SONET" et "SDH" sont mis pour "*Synchronous Optical Network*" et pour "*Synchronous Digital Hierarchy*". Ces termes désignent des ensembles de protocoles reliés à l'utilisation de la fibre optique dans les réseaux. La hiérarchie numérique synchrone (SDH) est la version européenne (c'est à dire répondant aux attentes des européens) du réseau optique synchrone (SONET) qui est un protocole d'origine américaine. Pour la norme SDH, les niveaux sont organisés hiérarchiquement en STM - n (Synchronous Transport Module, niveau n).

Les réseaux SDH les plus déployés sont aujourd'hui des réseaux combinant les niveaux STM 1 (155 Mbit/s), STM 4 (622 Mbit/s) et STM 16 (2,5 Gbit/s).

La technologie SONET/SDH utilise un multiplexage temporel à travers des multiplexeurs appelés ADM (Add/Drop Multiplexeur) ou MIE (Multiplexeur à Insertion/Extraction). Le multiplexeur terminal (TM, Terminal Multiplexer) permet le multiplexage de signaux affluents (PDH) dans un signal de ligne STM-1 résultant.

Les répéteurs-régénérateurs sont des équipements qui permettent, dans une transmission longue distance, d'amplifier et de remettre en forme le signal optique. La technologie SDH se retrouve aussi bien en topologie point à point, bus et surtout anneau. Il faut préciser que le principal support est la fibre optique. Un réseau en anneau est une chaîne, repliée sur elle-même et refermée, constituée uniquement de noeuds ADM et ne possédant pas de noeud terminal. Ce type de réseau joue un rôle clé en SDH/SONET grâce aux mécanismes performants d'autocicatrisation (délai SONET grâce aux mécanismes performants d'autocicatrisation (délai de rétablissement < 50 ms) du réseau en cas de défaillance (par exemple : câble coupé, panne d'électricité ou incendie dans un noeud du réseau). Les applications des réseaux en anneau sont nombreuses : réseaux d'accès aux réseaux nationaux, en passant par les réseaux locaux et régionaux.

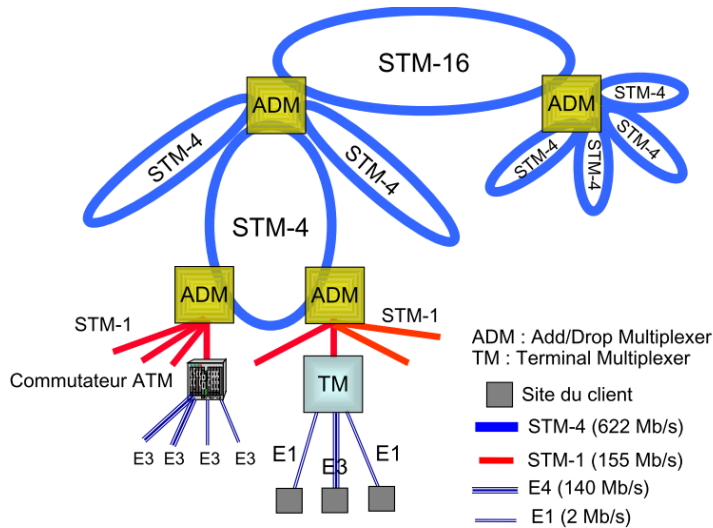


Figure 2 : Exemple de réseau SDH

Le SDH peut transmettre des données multiples de 1.536 Mb/s et 2.048 Mb/s, c'est à dire les débits PDH dont elle assure le relais. Les débits de base de la hiérarchie synchrone sont 155,520 Mbit/s, 4 fois 155,520 (environ 620 Mbit/s) et 16 fois 155,520 (environ 2,5 Gbit/s). Parfois, les données sont transportées dans un débit de base plus faible, 51.84 MB/s qui est constitué par une suite de trames appelées STM-0. Le passage de la trame de base à un débit supérieur s'effectue simplement par entrelacement d'octet et non bit à bit comme c'est le cas pour la hiérarchisation PDH. De nos jours, les systèmes sont à 64 x 155,520 Mbit/s soit environ 10 Gbit/s. Ces informations ne transitent non plus sur des câbles mais sur des fibres optiques.

Niveau SDH	Débit en kbit/s	Niveau SONET	Débit en kbit/ s	Supports
STM - 1	155.520	STS - 1	51.840	FO,Coax, radio
STM - 4	622.080	STS- 3	155.520	FO
STM - 16	2.488.320	STS - 12	622.080	FO
STM - 64	9.953.280	STS - 48	2.488.320	FO

Tableau récapitulatif des débits des normes SDH et SONET

Le transport de données s'effectue par blocs de données appelées Trames ; chaque bloc comporte deux principales zones de données : La zone des informations ou données de services, et les données transportées désignées par charge utile. La trame de base, appelée STM-1 'Synchronous Transfer Module 1' est structurée en octet.

Ainsi, la SDH introduit de nouvelles possibilités dans les réseaux de transmission :

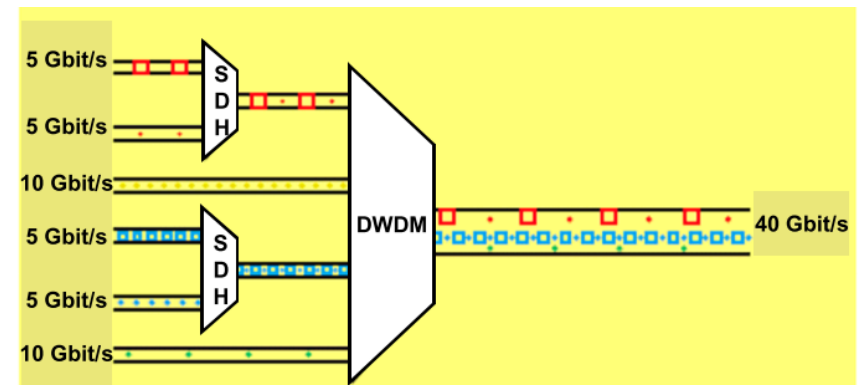
- souplesse accrue par la possibilité d'extraire ou d'insérer directement un signal constituant du multiplex de ligne ;
- facilités d'exploitation-maintenance : des débits importants sont réservés à ces fonctions ;
- possibilité d'évolution vers des hauts débits : les trames synchrones haut débits sont construites par multiplexage synchrone de l'entité de base. Cette entité de base définit implicitement toutes les trames
- haut débit, la limitation n'est plus que technologique ;

- interconnexion de systèmes à haut débit facilitée par la normalisation de la trame de ligne et des interfaces optiques correspondantes ;
- architectures de réseaux assurant la sécurisation contre les défauts de ligne ou d'équipement
- la modularité des équipements SDH est plus adaptée aux progrès de la technologie que les équipements PDH.

8.3 D-WDM

La capacité de transport de la fibre optique continue d'augmenter régulièrement grâce au multiplexage en longueur d'onde. Dans le même temps, le débit de chaque longueur d'onde ne cesse de progresser. On estime qu'il a été multiplié par deux tous les six mois de 2000 à 2004, date à laquelle on a atteint près de 1 000 longueurs d'onde. Comme, sur une même longueur d'onde, la capacité est passée pour la même période de 2,5 à 40 Gbit/s et bientôt 160 Gbit/s, des capacités de plusieurs dizaines de téraoctets par seconde (Tbit/s, ou 1012 bit/s) sont aujourd'hui atteintes sur la fibre optique.

Le multiplexage en longueur d'onde, ou WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), consiste à émettre simultanément plusieurs longueurs d'onde, c'est-à-dire plusieurs lumières, sur un même cœur de verre. Cette technique est fortement utilisée dans les cœurs de réseau. On l'appelle DWDM (Dense WDM) lorsque le nombre de longueur d'onde devient très grand.



Exercices

Exercice 1

1. Quel est le débit minimal exigé pour acheminer une parole de meilleure qualité que la qualité téléphonique (codage des échantillons sur 10 bits au lieu de 8 bits) sur un réseau de bande passante égale à 10 KHz ?
2. Un multiplexeur en fréquence transporte-t-il plus d'information pour une même bande passante, qu'un multiplexeur temporel ?
3. Une voie de transmission véhicule 16 signaux distincts. Quelle est la quantité d'information binaire maximale pouvant être transportée par chaque signal ?
4. Le rapport signal sur bruit d'une voie de transmission est de 30dB ; sa largeur de bande est de 2 MHz. Quelle est, approximativement, la capacité théorique de cette voie ?

Exercice 2

Une image TV numérisée doit être transmise à partir d'une source qui utilise une matrice d'affichage de 450×500 pixels, chacun des pixels pouvant prendre 32 valeurs d'intensité différentes. On suppose que 30 images sont envoyées par seconde.

1. Quel est le débit D de la source ?
2. L'image TV est transmise sur une voie de largeur de bande 4,5 MHz et un rapport signal/bruit de 35 dB. Déterminer la capacité de la voie.

Exercice 3

Un système de transmission numérique fonctionne à un débit de 9600 bits/s.

1. Si un signal élémentaire permet le codage d'un mot de 4 bits, quelle est la largeur de bande minimale nécessaire de la voie ?
2. Même question pour le codage d'un mot de 8 bits.

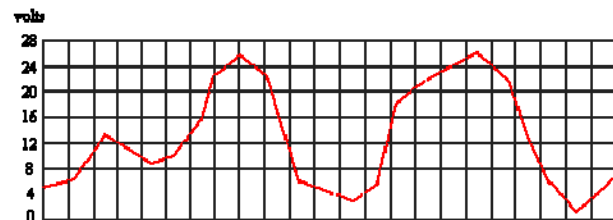
Exercice 4

Sur une voie de transmission, on constate que le nombre de communications par heure est de 1,5 et que chaque communication a une durée moyenne de 360 secondes. Quel est le trafic correspondant ?

Sachant que pour cette voie de transmission, le nombre de transactions par communication est de 4000, la longueur moyenne d'une transaction est de 12000 bits, le débit binaire est 64 Kbits/s, donner le taux d'occupation de la voie.

Exercice 5

Soit le signal audio suivant :



Le codage étant effectué sur 8 niveaux et l'échantillonnage étant défini sur la figure ci-dessus, en déduire le codage binaire de ce signal.

Exercice 6

Deux stations s'échangent de l'information via un satellite de communication situé à 36000 km de la surface de la terre. La vitesse de propagation du signal sur le support de transmission (l'air) entre le satellite et une station terrestre est égale à celle de la lumière, c-à-d environ 300000 km/s. Supposant que l'une des stations émet un message vers l'autre station, d'une taille de 800 bits et avec un débit binaire de 64 Kbit/s :

1. Calculer alors le temps de transmission de ce message.
2. Calculer le temps de transfert.

L'une des méthodes les plus simples pour la détection d'erreurs de transmission consiste à faire retourner par le récepteur une copie du message qu'il reçoit. L'émetteur compare alors les deux messages :

3. Calculer le temps de communication en supposant que le support de transmission est exploité en Half et en Full duplex.

Exercice 7

Pour un signal ayant deux états distincts, d'une durée de 5 ms :

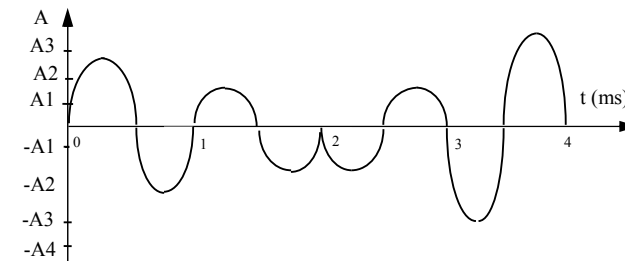
1. Représenter le message 110001011010 en mode de transmission en bande de base avec le code *Non Retour à Zéro*.
2. Représenter ce même signal avec huit états distincts.
3. Calculer le débit binaire et le temps de transmission pour chacun des deux cas.

La ligne de transmission utilisée est d'une largeur de bande de 2200 Hz :

4. Trouver le débit maximal de transmission.
5. L'échange d'informations s'effectue dans des conditions défavorables, où on a un bruit continu pendant 4 ms. Quel serait alors le nombre de bits mal reçus (en supposant que le débit est maximal).

Exercice 8

Soit le signal analogique suivant, véhiculant le message binaire 011010001101 sur une ligne de transmission d'une capacité de 4000 bit/s.

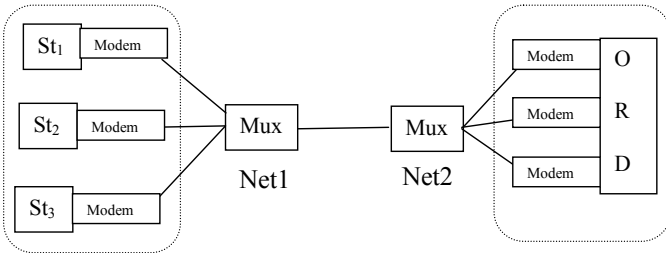


1. En déduire la valence du signal.

- Donner le procédé de modulation utilisé par le modem.
- Calculer le débit binaire de la transmission.
- Proposer une technique de modulation pour permettre un débit égal à la capacité de la ligne de transmission.
- Représenter alors le nouveau signal utilisé.

Exercice 9

Deux réseaux locaux distants Net_1 et Net_2 sont reliés par l'intermédiaire d'une ligne Haute vitesse et deux multiplexeurs/démultiplexeurs (MUX_1 et MUX_2). Les MUX/DEMUX, se basent sur un multiplexage temporel synchrone pour l'envoi des messages entre les deux réseaux.

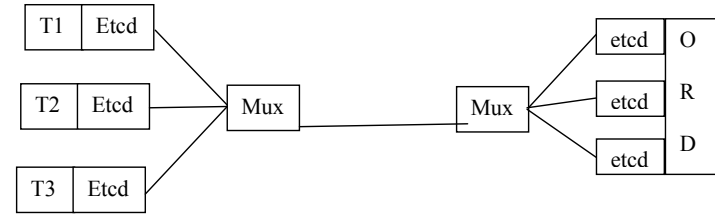


Trois stations du réseau Net_1 : St_1 , St_2 et St_3 , reliées à MUX_1 , communiquent avec un ordinateur central ORD du réseau Net_2 , via des modems de même rapidité égale à 4000 bauds, mais de modulation différente. On suppose que M_1 utilise deux fréquences $f_1 = 4000$ Hz, $f_2 = 12000$ Hz ; deux amplitudes (A_1 et A_2) et deux phases ($\phi_1 = \pi/2$, $\phi_2 = 3\pi/2$). Le modem M_2 utilise une fréquence $f_1 = 4000$ Hz ; deux amplitudes (A_1 et A_2) et deux phases ($\phi_3 = 0$, $\phi_4 = \pi$). Enfin le modem M_3 utilise deux fréquences $f_3 = 8000$ Hz, $f_2 = 12000$ Hz, une amplitude A_1 et une phase $\phi_4 = \pi$.

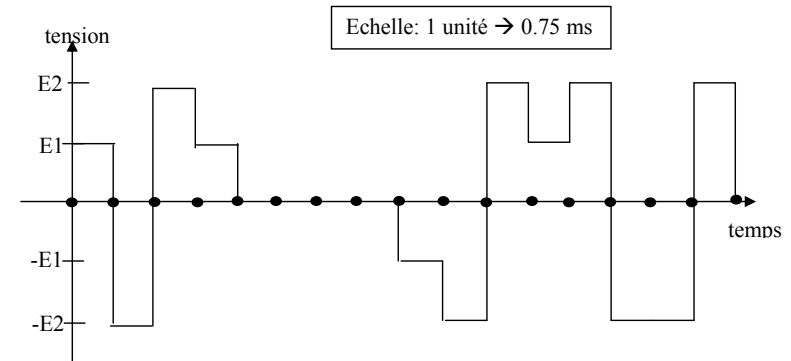
- Donner le type de modulation de chaque modem ainsi que son débit.
- Représenter les signaux modulés, sur les lignes reliant les modems au multiplexeur, correspondants aux messages $Ms_1 = 110100$, $Ms_2 = 0011$, $Ms_3 = 0111$ envoyés respectivement par St_1 , St_2 et St_3 .
- Quelle est la valeur du quantum, si une scrutation est nécessaire pour envoyer le message de Ms_1 et Ms_2 et deux pour envoyer celui de Ms_3 .
- Représenter alors les messages Ms_1 , Ms_2 et Ms_3 sur la ligne partagée.
- Déterminer la longueur de la ligne partagée, sachant que le temps de transfert, du message de Ms_1 , entre les deux multiplexeurs est égal à 1ms, avec une vitesse de propagation du signal de 300 000 m/s.

Exercice 10

Soit l'architecture d'un réseau informatique suivant, sachant que les terminaux utilisent la même configuration du matériel (même type d'ETCD et même type de ligne), avec un multiplexage temporel synchrone dans l'ordre T1, T2, T3.



Soit la représentation suivante d'un message M sur la ligne commune :



- Quel type de transmission est utilisé ? Justifiez.
- En supposant qu'on envoie 8 bits par quantum, donnez sa valeur.
- Donnez les messages correspondants à chaque terminal en supposant que le message M envoyé sur la ligne principale est 100011100100111011000011.
- Donnez la rapidité de modulation d'un terminal.
- Représentez le message transmis par T1 en code Manchester.
- Calculez le temps de transmission du message 'RESEAUX', codé en ASCII avec contrôle de parité par caractère, transmis par le terminal T3.
- Donnez le temps de transmission du message 'RESEAUX' par le multiplexeur.