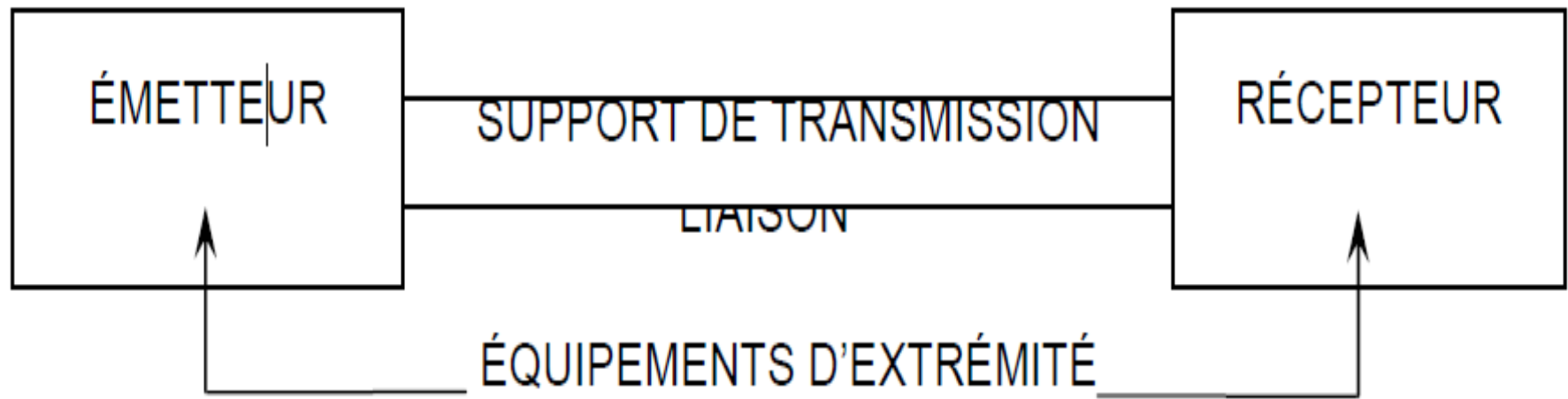


# Les supports de transmission

La transmission de données entre un émetteur et un récepteur<sup>10</sup> suppose que soit établie une liaison sur un support de transmission (appelée aussi voie de transmission ou canal) munie d'équipement de transmission à ses extrémités.



**Figure 2.1** Schématisation d'un système de transmission.

La transmission utilise un **signal** basé sur le principe de **propagation d'ondes**: ondes *électriques* (câbles, fils, ...), ondes *radio* (faisceau hertzien, satellite), ondes *lumineuses* (fibres optiques).

- L'étude de la transmission de l'information nécessite la connaissance :
- des principes du **signal**
- des **supports** de transmission et de leurs caractéristiques,
- des **méthodes** utilisées pour transmettre l'information sur ces supports (**adaptation du signal** au support de transmission) : opération réalisée par un **ETCD** (adaptateur de ligne)

- **Notion de signal**

Signal toute variable ou source d'information évoluant en fonction du temps. Exemple : un signal  $s(t)$ , en électronique est une tension  $v(t)$  ou un courant  $i(t)$ .

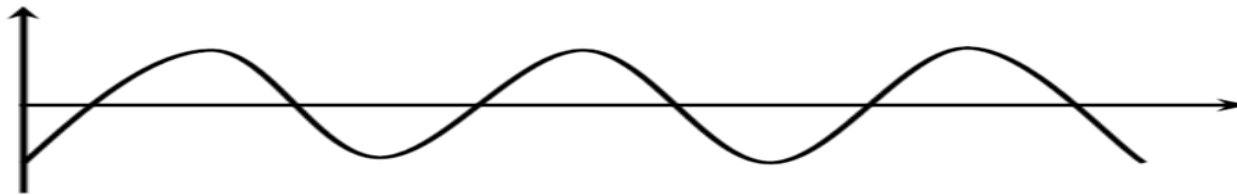
Lorsque l'amplitude d'un signal est connue ou peut être déterminé à chaque instant, le signal est dit déterministe.

## **Types de signaux**

Dès qu'il s'agit de communication de données, le terme signal *analogique* et *numérique* revient constamment.

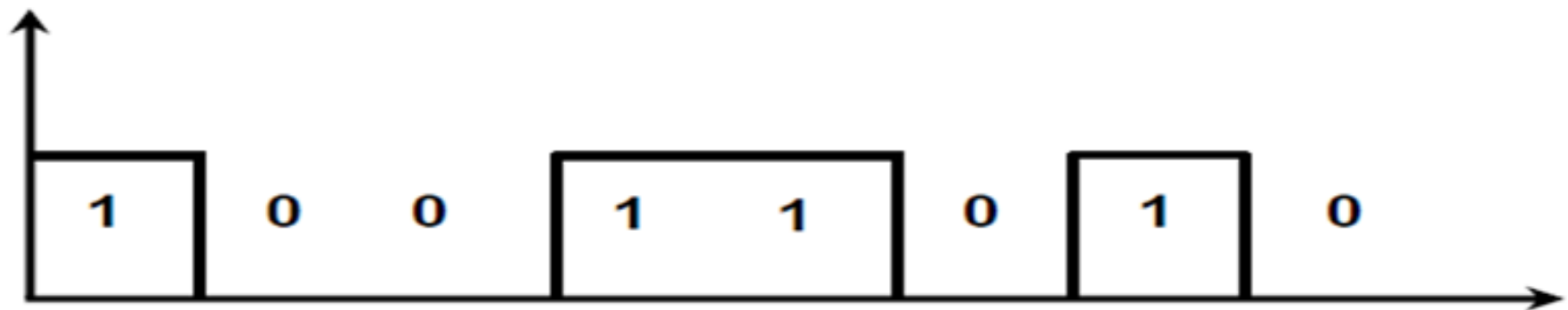
**Analogique** : Dans un signal analogique, tel que celui en usage pour la diffusion radio et TV, les informations voyagent sous forme d'onde continûment variable. Comme le montre l'illustration suivante.

Un signal est toujours une grandeur physique analogique et cette discrimination réfère donc au contenu de l'information qu'il transporte. Un signal analogique prend des valeurs continues et varie en amplitude, fréquence et phase



**Figure 1.1** Exemple de signal analogique

Un signal numérique prend 1 série de valeurs discrètes représentées par un signal élémentaire appelé moment (par exemple : amplitude avec 2 valeurs discrètes 0 ou  $+V$  pour un moment binaire, amplitudes  $-V, 0, +V$  pour un moment ternaire,...Le débit de moments s'exprime en Bauds.

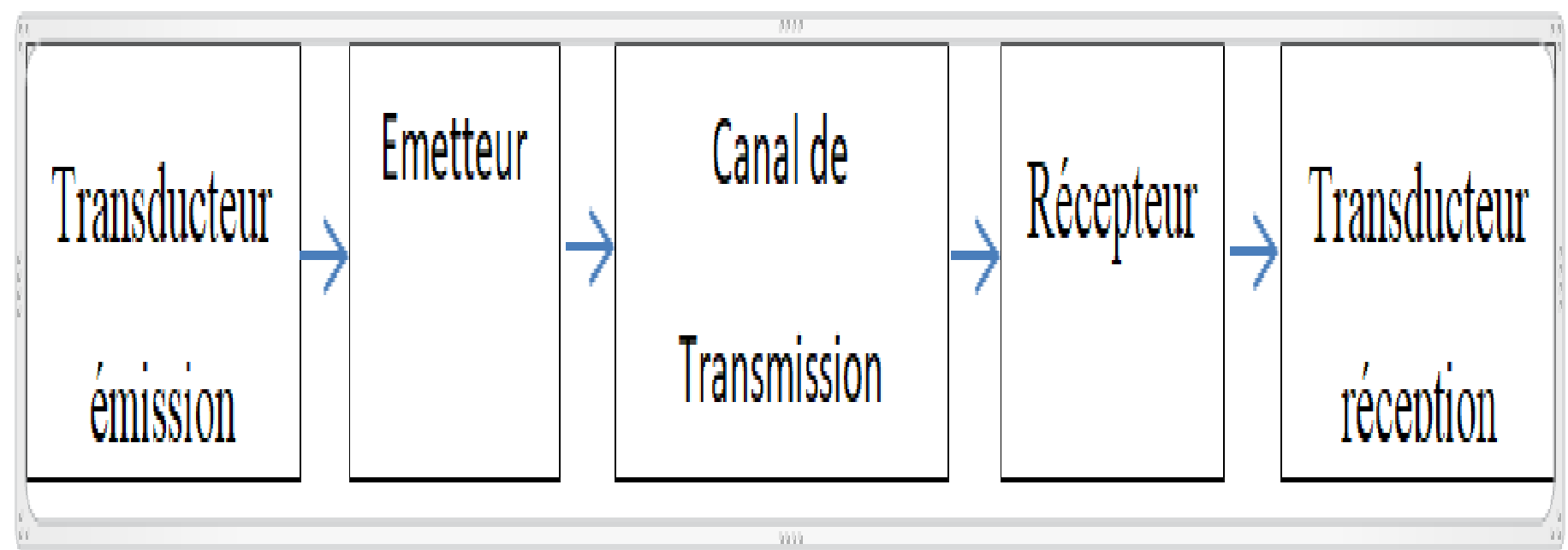


**Figure 1.2** Exemple de signal numérique

# Chaîne de transmission

La chaîne de transmission de l'information, dans sa structure fonctionnelle la plus simple, est constituée :

- D'un émetteur ;
- D'un canal de transmission ;
- D'un récepteur



# L'émetteur

L'émetteur a pour fonction d'adapter le signal issu du transducteur en vue de le transmettre au canal de transmission.

Il peut simultanément remplir plusieurs fonctions :

- Coder le signal issu du transducteur (tension) en nombres, dans le cas d'une conversion analogique numérique ou/et de chiffage ;
- Moduler ;
- Amplifier.
- Cet émetteur peut être un émetteur analogique (exemple : émetteur radio FM) ou encore un modem ADSL utilisé pour Internet dans le cadre d'une information numérique

# Le récepteur

Son rôle est à la fois de recevoir le signal émis ainsi que de le rendre compatible avec le transducteur (exemple : haut-parleur) servant à la réception. Les actions réalisées par le récepteur sont alors les suivantes :

- Filtrer le signal reçu (éliminer la partie inutile du signal reçu pour ne garder que l'information) ;
- Décoder :
  - soit en réalisant une conversion numérique analogique ;
  - soit un déchiffrage ;
- Démoduler ;
- Amplifier le signal pour le rendre utilisable par le transducteur de sortie.
- Ce récepteur est par exemple un poste de radiophonie pour un signal analogique ou un modem ADSL po

# Supports de transmission

Permet de transporter des données sous forme de signaux

2 types de support :

- Supports avec un guide physique :
  - Paire téléphonique / torsadée
  - Câble coaxial
  - Fibre optique
- Supports sans guide physique :
  - Faisceau hertzien
  - Liaison satellite



# Caractéristiques des supports de transmission

Un support n'est jamais parfait !

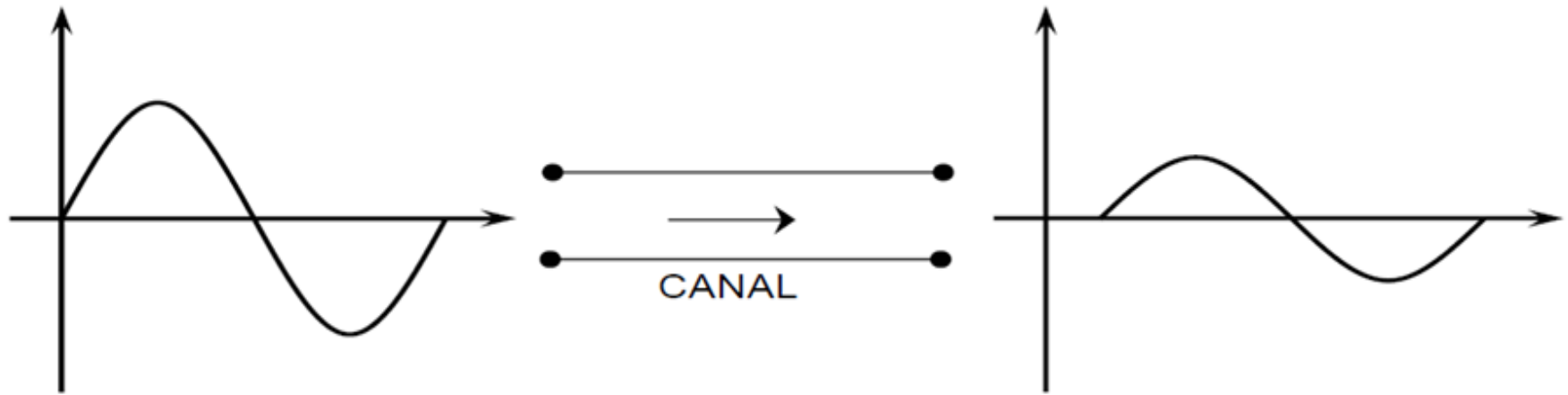
## Affaiblissement

Un canal de transmission atténue (affaiblit) l'amplitude du signal qui le traverse. Le phénomène d'atténuation correspond à une *perte d'énergie du signal* pendant sa propagation sur le canal.

On mesure l'atténuation par le rapport  $\frac{P_s}{P_e}$  où  $P_s$  est la puissance du signal à la sortie du canal et  $P_e$  la puissance du signal à l'entrée du canal. Il est courant d'exprimer l'atténuation en décibels (dB) sous la forme  $10\log\frac{P_s}{P_e}$  (elle est aussi exprimé en décibels par kilomètre)

- **Déphasage**

Le déphasage %, encore appelé distorsion de phase, implique un retard du signal reçu par rapport au signal émis dû au temps de propagation de ce signal de l'émetteur vers le récepteur.

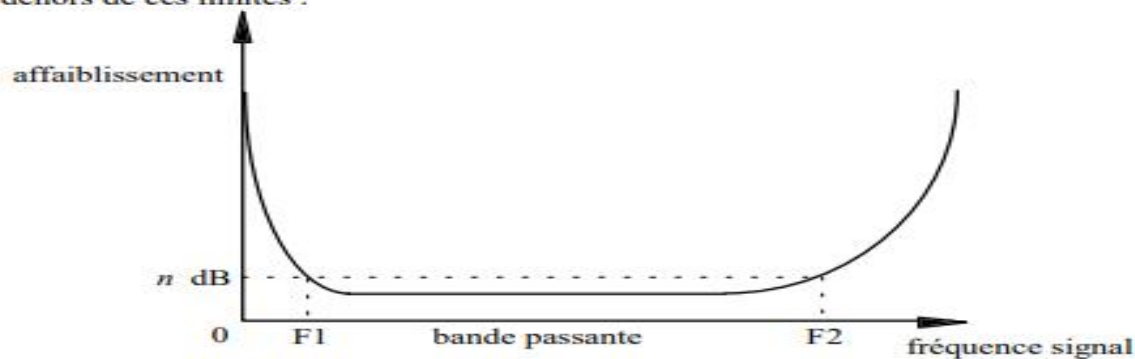


# Bande passante

La largeur de la bande passante est la *caractéristique essentielle* d'un support de transmission, qui se comporte généralement comme un filtre qui ne laisse donc passer qu'une bande limitée de fréquence appelée *bande passante*. Toute fréquence en dehors de cette bande est fortement affaiblie.

## 6.1.3. Bande passante, rapidité de modulation et capacité de transmission

L'affaiblissement du signal sur une ligne est en général considéré négligeable pour les fréquences comprises entre deux fréquences-limite — définissant la *bande passante*  $H = F2 - F1$ , mesurée en Hz, de la ligne — et augmente rapidement en dehors de ces limites :



La bande passante se définit par rapport à un affaiblissement admissible, souvent  $A = 3\text{dB}$  (ceci correspond donc à une baisse admissible de 2 fois de l'énergie du signal, donc à une baisse de 1,4 fois de son amplitude).

Toutes les composantes harmoniques d'un signal ne subissent ni le même affaiblissement, ni le même déphasage, donc le signal reconstruit à l'arrivée n'a pas la même forme que le signal émis. La valeur de la bande passante  $H$  de la ligne impose donc une limite sur la rapidité à laquelle sont effectués les changements d'état significatifs du signal — appelée *rapidité de modulation* ( $R$ ) ou *vitesse de signalisation* et mesurée en *bauds* — représentant l'information à transmettre (plus ces changements sont rapides, plus la bande passante exigée du canal pour que le signal émis puisse être reconstitué à la réception est large). Relation de Nyquist :

$$R = 2H.$$

Souvent, le nombre d'états significatifs du signal (appelé aussi *valence*) est  $V > 2$  ; dans ce cas, le *débit binaire* (en bit/s) de la ligne est donné par :

$$D = 2H \log_2 V$$

Souvent, le nombre d'états significatifs du signal (appelé aussi *valence*) est  $V > 2$  ; dans ce cas, le *débit binaire* (en bit/s) de la ligne est donné par :

$$D_{\max} = 2H \log_2 V.$$

La quantité de bruit présent sur une ligne de transmission peut être quantifiée en utilisant le rapport entre l'énergie utile du signal et l'énergie du bruit, S/B (rapport exprimé en général comme  $10 \log_{10} S/B$ , en dB).

Pour une ligne de transmission sensible au bruit, Shannon montre que la valence maximale utilisable dépend du rapport signal/bruit selon :

$$V = \sqrt{1 + \frac{S}{B}},$$

et donc le débit résultant, appelé *capacité de transmission* ( $C$ , en bit/s), est :

$$C = H \log_2 \left( 1 + \frac{S}{B} \right).$$

Par exemple, pour le réseau téléphonique commuté (RTC), la bande passante à 3 dB est de 3,1 kHz (300 Hz à 3400 Hz) et le rapport signal/bruit de 30 dB (donc  $S/B = 1000$ ) ; la capacité de transmission est alors  $\sim 28\,000$  bit/s.

Il faut remarquer que le rapport signal/bruit, la bande passante et par conséquent la capacité de transmission dépendent de la longueur de la ligne.

# Bruit

Le bruit est un *signal perturbateur* provenant du canal lui-même ou de son environnement externe. Il est de comportement aléatoire et vient *s'ajouter* au signal véhiculant les informations et provoquer ainsi les *erreurs de transmission* (on va voir dans la dernière partie de ce chapitre comment protéger l'information contre ces bruits).

On distingue généralement deux types de bruit : le bruit blanc et le bruit impulsif.

## Bruit blanc

Le bruit blanc<sup>13</sup> est un bruit dont la puissance est uniformément répartie dans toute la bande passante du canal, il s'agit essentiellement d'un bruit provoqué par l'agitation thermique des électrons dans le conducteur électrique.

## Bruit impulsif

Comme son nom l'indique ce type de bruit est à caractère impulsif, il se présente sous forme de tensions perturbatrices de valeur élevée mais de durée brève. Ces bruits sont très gênants pour la transmission de données, car le signal perturbateur modifie la *forme* du signal reçu à des instants quelconques (aléatoires) telles qu'il se produit des erreurs à la réception.

# Notion de rapport signal sur bruit

La quantité de bruit présente sur un canal de transmission, est exprimé par le rapport de la puissance du signal transmis sur la puissance de bruit et prend le nom de *rapport signal sur bruit*, nous écrivons ce rapport et on a coutume de l'exprimer sous la forme  $B10\log S$  en décibels (dB). Ce rapport varie dans le temps, puisque le bruit n'est pas uniforme, toutefois on peut en estimer une valeur moyenne sur un intervalle de temps. Le rapport signal sur bruit est aussi une caractéristique d'un canal de transmission.

# Taux d'erreur binaire d'un signal bruité

Alors que la qualité d'un signal analogique est dégradée par toute distorsion ou atténuation non linéaire créée par le canal de transmission, la qualité d'un signal numérique ne sera réduite que si les effets négatifs du canal conduisent le récepteur à confondre plusieurs symboles ou bits dans le cas d'un signal binaire. Afin de quantifier la dégradation subie par un signal numérique ou de spécifier la qualité que doit atteindre une transmission numérique, on utilise la notion de **taux d'erreur binaire** ou **Bit Error Rate (BER)**. Il s'agit du taux d'erreur mesuré à la réception d'une transmission numérique, et se calcule à l'aide de l'équation

$$BER(\%) = \frac{\text{nombre de bits erronés}}{\text{nombre total de bits reçus}}$$

# Principaux supports de transmission

## Les supports guidés

### La paire torsadée

Constituée de deux conducteurs identiques torsadés. Les torsades réduisent l'inductance de la ligne (L).

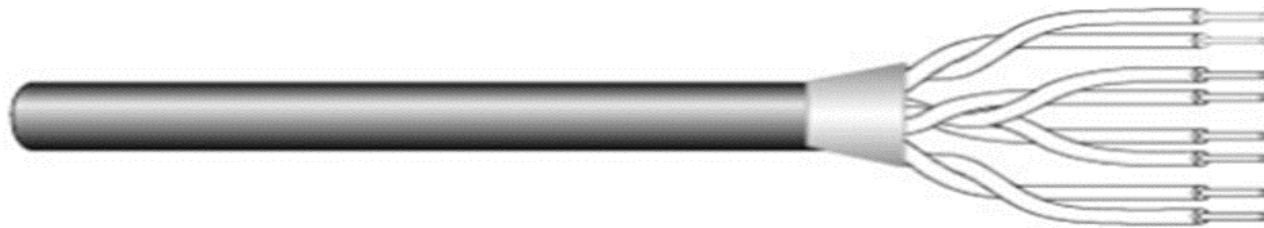
Généralement plusieurs paires sont regroupées sous une enveloppe appelée gaine pour former un câble. Les câbles contiennent 1 paire (desserte téléphonique), 4 paires (réseaux locaux), où plusieurs dizaines de paires (câble téléphonique).

Les signaux transmis dans ce type de médium peuvent, selon leurs caractéristiques, parcourir plusieurs dizaines de kilomètres sans amplification ou régénération. Au-delà de ces distances, la remise en forme des signaux numériques en bande de base, et l'amplification des signaux analogiques en modulation sont nécessaires.

Généralement dans un même câble il y a rassemblement de plusieurs paires torsadées, et les signaux qui sont transportés dans ces diverses paires peuvent interférer les uns sur les autres par rayonnement. Ce phénomène est appelé **diaphonie**.



Si les distances entre deux entités de communication sont inférieures à 1 kilomètre les vitesses de transmissions peuvent atteindre plusieurs centaines de Kbit/s avec des taux d'erreurs très acceptables. Sur des distances plus courtes, on atteint aisément le Mbit/s. Il existe toute une variété de câbles à paires torsadées présentant des caractéristiques et des performances électriques différentes; leurs prix sont également liés à ces performances.



Voici les cinq catégories de paires torsadées :

Catégorie 1: Elle n'a aucune contrainte et sert pour les communications bas débit.

Catégorie 2: Fréquence de 2 Mhz, de 2 à 25 paires. Dédié au transport de voix et bas débit.

Catégorie 3: Référence pour les réseaux locaux Ethernet et Token Ring, fréquence de 10 Mhz.

Catégorie 4: Complément de la catégorie 3 pour une plus grande sécurité.

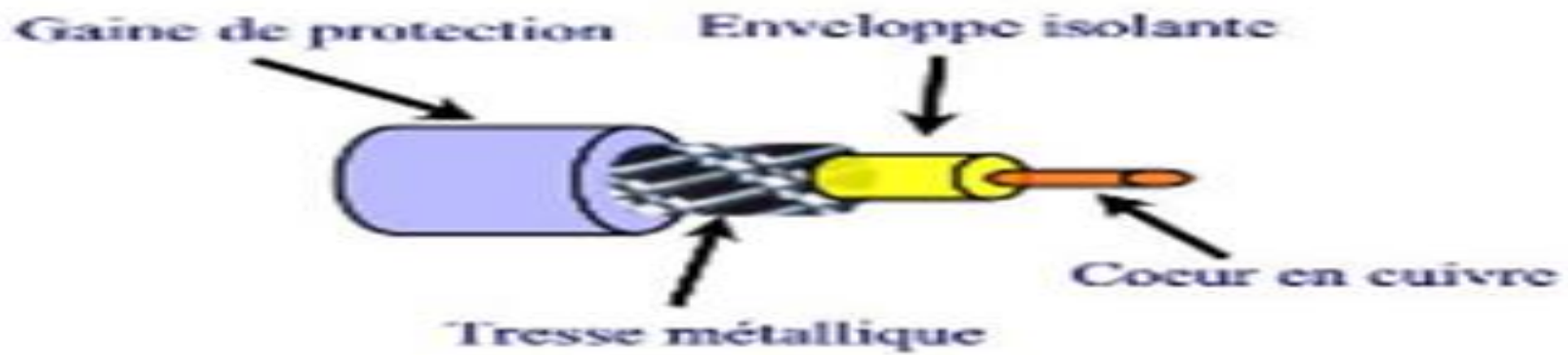
Catégorie 5: Le standard le plus élevé avec une fréquence de transmission de 100 Mhz.

# Le Câble coaxial

Un autre support de transmission courant est le câble coaxial (souvent abrégé en coax). Il bénéficie d'une meilleure protection que la paire torsadée, ce qui lui permet d'offrir un débit élevé sur de plus longues distances.

Deux types de câble coaxial sont très répandus : L'un d'une impédance de 50 ohms, est fréquemment utilisé dans les installations qui, dès le départ, se destinent à la transmission numérique. L'autre de 75  $\Omega$ , est généralement utilisé pour la communication analogique et la télévision par câble, mais gagne en importance depuis l'apparition de l'accès Internet par le câble.

Un câble coaxial se compose d'une âme, un conducteur rigide en cuivre, enfermée dans un matériau isolant lui-même entouré d'une tresse conductrice. Une gaine en plastique protectrice recouvre le tout.



De par sa constitution et son blindage, le câble coaxial offre à la fois une large bande passante et une excellente immunité contre le bruit. La largeur de bande dépend de la qualité du câble, de sa longueur et du rapport signal sur bruit. Dans les câbles modernes, elle se rapproche de 1 GHz. Ce type de câble était largement employé au sein du système téléphonique sur les lignes interurbaines, mais il est maintenant remplacé par la fibre optique, surtout sur les artères longue distance. Il est toutefois encore très utilisé pour la télévision par câble et sur les réseaux métropolitains.

Les inconvénients majeurs du cuivre sont une forte atténuation et une vitesse de transmission relativement faible, ce qui limite la distance maximum entre deux stations ou entre deux appareils d'interconnexion.

# La fibre optique

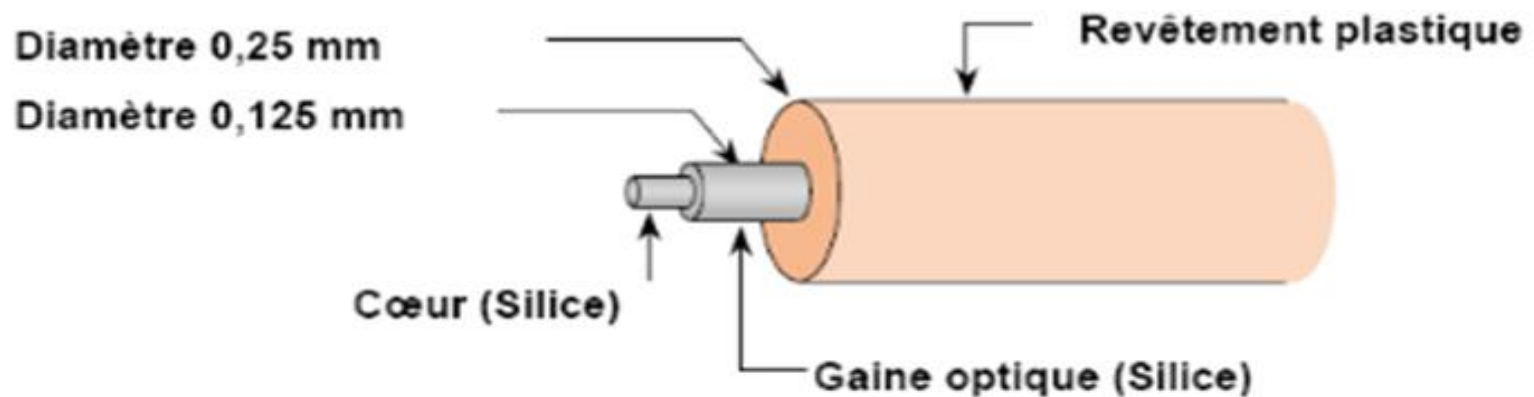
La fibre optique est une alternative de plus en plus répandue aux câbles métalliques, qui utilise la lumière comme support des informations plutôt que l'électricité.

Il faut donc ajouter deux étages transducteurs (les équipements destinés à convertir les signaux), l'un au départ, pour assurer la conversion électricité /lumière ; l'autre, à l'arrivée, pour la conversion inverse. Dans le premier cas, il s'agit d'une diode laser ; dans le second, d'une photo diode.

La fibre optique est de plus en plus utilisée grâce à ses propriétés exceptionnelles et particulièrement une bande passante très élevée et une atténuation très faible. Elle offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des cuivres et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, la téléphonie, la visioconférence ou les données informatiques.

La fibre optique est un guide diélectrique, filiforme, translucide permettant la transmission de la lumière. Elle est fabriquée avec le matériau en verre de quartz ou en silice extrêmement pur avec adjonction de bore, de phosphore ou de germanium.

Les fibres sont placées dans un tube de protection puis réunies en un câble à plusieurs fibres armées d'acier pour supporter l'attraction ; elles ont un diamètre de cœur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de micromètre



- Le signal lumineux est propagé dans et à proximité du cœur.
- La gaine optique sert essentiellement à amener le diamètre à 125 $\mu$ m, pour des raisons mécaniques.
- Le revêtement sert à protéger la fibre optique.

# Types de fibres optiques

Suivant les modes de propagations qu'elles utilisent, les fibres optiques peuvent être classées en 3 catégories:

- Les fibres monomodes
- Les fibres multimodes à saut d'indice
- Les fibres multimodes à gradient d'indice

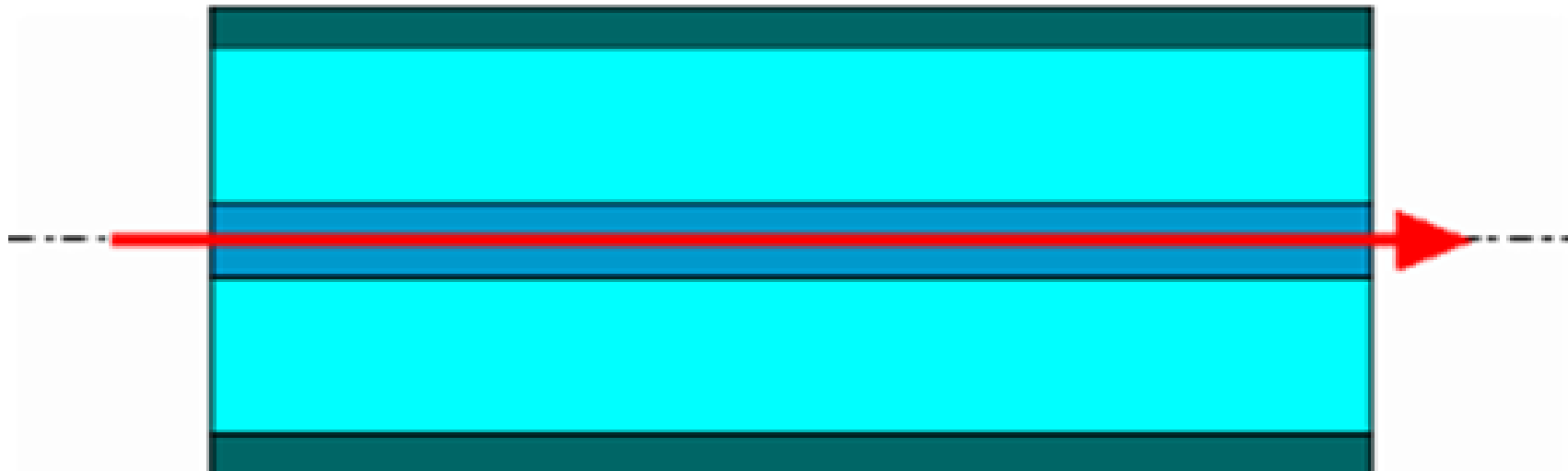
# Fibre monomode

Le diamètre de la fibre étant plus petit, elle transporte le signal sur un seul chemin lumineux. Elle est surtout utilisée pour des très longues distances.

C'est ce type de fibre qui présente les plus grandes performances mais son coût est relativement élevé par rapport aux fibres multimodes.

Diamètre du coeur 5 à 10 $\mu$ m, gaine 125 $\mu$ m ; Bande passante très élevée de l'ordre du tétra hertz au km ; Atténuation très faible 0.5dB/km à 13 $\mu$ m et 0.2dB/km à 1.5 $\mu$ m raccords très délicats.

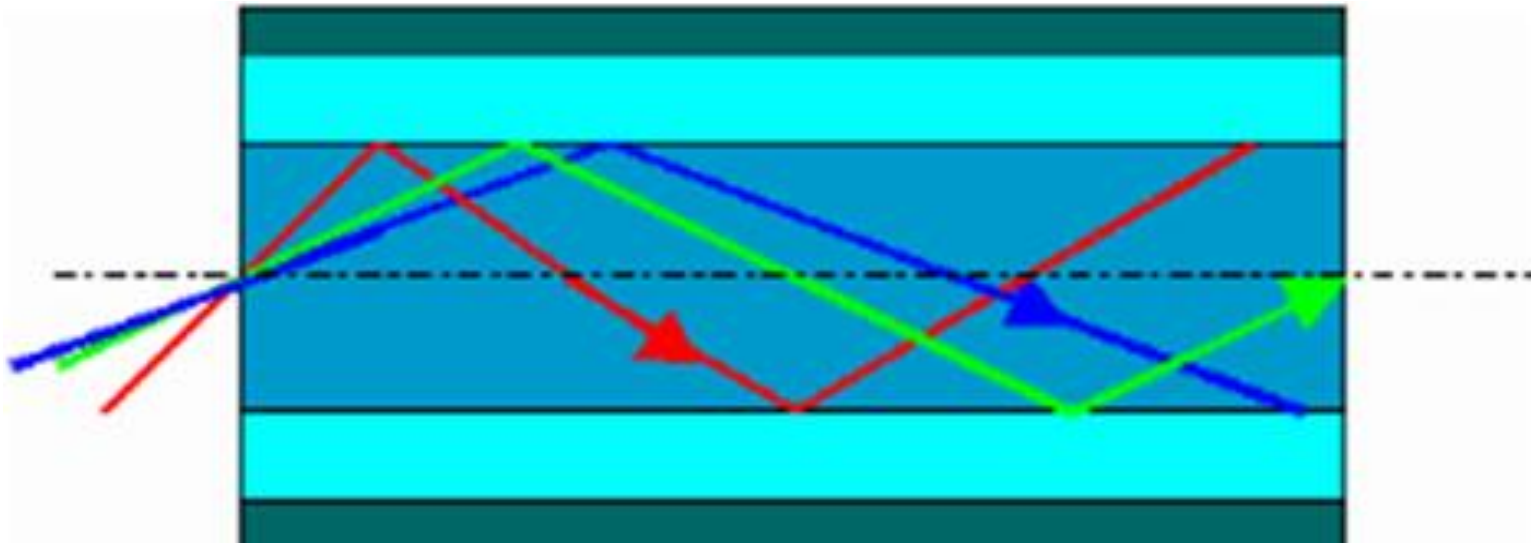
Utilisée essentiellement par des opérateurs des télécommunications. Actuellement des liaisons de 100 à 300 km sans répéteurs sont possibles



# Fibre multimodes à saut d'indice

La lumière se réfléchit angulairement (en Zig-Zag). C'est le plus courant dans les entreprises.

- L'indice du coeur de la fibre est constant ;
- Diamètre du coeur 50 $\mu\text{m}$  ou 62.5 $\mu\text{m}$  le plus souvent, gaine 1,25 $\mu\text{m}$
- Ouvert numérique 12°
- Bande passante : 60MHz.km
- Atténuation faible : 3dB/km à saut 0,85 $\mu\text{m}$





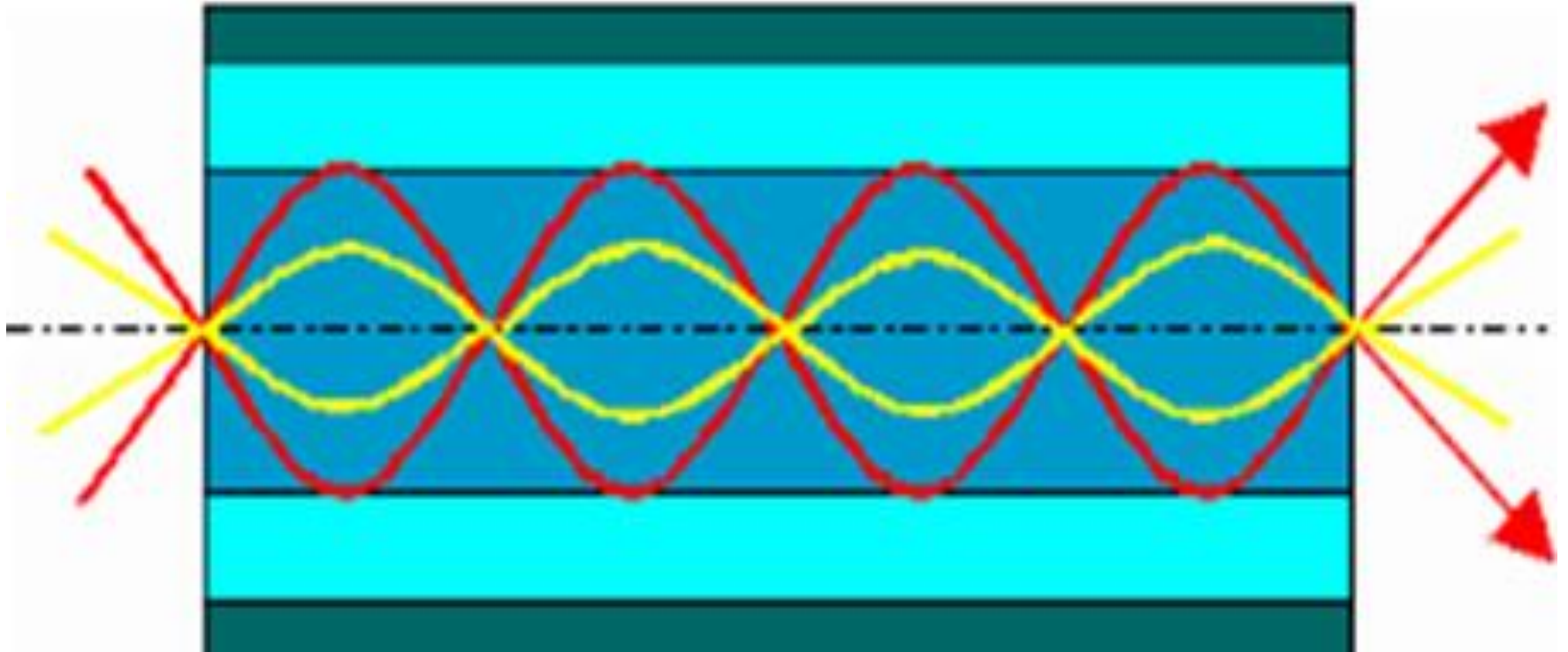
# Fibre multimodes à gradient d'indice

La lumière suit une trajectoire sinusoidale. Elle est utilisée pour des lignes téléphoniques de moyenne portée

Diamètre du coeur : 50 $\mu$ m ou 62,5 $\mu$ m, gaine de 125 $\mu$ m

Bande passante : plusieurs GHz.km

Atténuation : 3 dB/km à 0,85 à 1,3 $\mu$ m







# Avantages et inconvénients de la transmission optique

- Avantages
  - § Très grande bande passante
  - § Très faible atténuation
  - § Insensibilité aux parasites électromagnétiques
  - § Très faible encombrement
  - § Confidentialité,
  - § Faible volume,
  - § Grande légèreté (quelques grammes par Km),
  - § Très bonne qualité de transmission,

- **Inconvénients**
  - § Difficultés de raccordement entre 2 fibres,
  - § Dérivations difficiles,
  - § Difficultés sur le multiplexage de l'onde,
  - § Coût d'exploitation élevé,

- **Applications de la fibre optique**

L'application de la fibre est plus considérable du côté télécoms, pour la construction des réseaux à grande échelle à l'exemple du câble transatlantique mais aussi, dans des épines dorsales (backbones) de certains réseaux assurées par cette dernière.

De nos jours, les stations de travail sont connectées entre elles à l'aide de réseaux utilisant la fibre optique car son utilisation permet des débits d'informations plus rapides et une plus grande sûreté lors des transmissions.

En téléphonie, les câbles coaxiaux sont remplacés peu à peu par des fibres optiques en effet, elles sont plus économiques sur des longues et courtes distances et le nombre de composants nécessaires est moins important.

Son utilisation est particulièrement intéressante pour les militaires car elle leur apporte certains avantages:

Faible poids

Insensibilité au brouillage et à la détection

# Raccordement des fibres optiques

Dans l'établissement d'une liaison par fibre optique on est contraint de relier :

La source émettrice à la fibre optique. (fibre amorce)

Les fibres optiques entre-elles.

La fibre optique au récepteur optique.

On distingue 3 méthodes de raccordement des fibres optiques :

## **Jointage**

Consiste à souder deux fibres entre-elles, bout à bout, par fusion des matériaux en utilisant une fusionneuse automatique. (Affaiblissement 0.15dB maxi.)

## **Epissurage**

Consiste, comme précédemment à assembler bout à bout deux fibres, et de coller le tout par l'apport d'une colle spéciale de même indice optique que les fibres à raccorder. (Affaiblissement 0.3dB maxi.)

## **Connexion**

Consiste à utiliser deux pièces mécaniques qui s'emboîtent ou se vissent pour amener les deux fibres en vis-à-vis.

Les connecteurs les plus utilisés sont :

Les connecteurs à baïonnettes ST ou ST2

Les connecteurs à encliquetage de type Push-pull SC



# **Les supports libres**

## **Faisceaux hertziens**

Ce sont des émissions électromagnétiques dirigées et reçues par des paraboles et des réflecteurs semi - périphériques.

Les faisceaux hertziens existent sous formes fixes ou mobiles et peuvent assurer la transmission des signaux analogiques ou numériques. Les équipements faisceaux utilisent les hyperfréquences. La forme ronde de la terre et la propagation en ligne droite des supers hautes fréquences (SHF) qu'on ait une station intermédiaire après 60km environ (ce qui constitue un bond).

# Satellites

Ce sont des dispositifs chargés de diffuser sur une partie de la surface terrestre sous forme de cône d'ondes, les ondes électromagnétiques reçues d'un seul point terrestre.

Bref, les liaisons sans fil sont possibles grâce à des infrarouges ou laser sur de courtes distances et grâce aux faisceaux hertziens pour les liaisons satellitaires. Les débits sont très élevés mais les transmissions sont sensibles aux perturbations et les possibilités d'écoute sont nombreuses.

Après avoir donné une idée générale sur les différents médias de transmission, nous allons aborder au chapitre suivant, les procédés de la fibre optique pour l'acheminement à très grande portée des flux importants d'informations intégrées sur une même ligne de transmission

Type	Bande passante	Applications
Paire torsadée	>100KHz	Téléphonie, LAN
Câble coaxial	>100MHz	Télévision, LAN
Fibre optique	>1GHz	LAN, WAN
Faisceaux hertziens	Dépend de la fréquence de la porteuse	Télévision, téléphonie mobile, LAN
Satellites	>10MHz	GPS, WAN

**Tableau 1 - Les différents supports de transmission et applications**

# Les lignes de transmissions

## Définition:

Les lignes de transmission permettent le transfert des informations. Les distances à parcourir, la bande passante des signaux et la technologie utilisée dépendent du type d'information. Ainsi, Les lignes utilisées pour les liaisons téléphoniques transatlantiques sont des fibres optiques de plusieurs milliers de kilomètres de longueur propageant des ondes électromagnétiques à des fréquences optiques ( $>10^{15}$  Hz), alors que celles reliant les composants électroniques dans un circuit intégré sont des pistes de quelque microns de long propageant des ondes électriques et électromagnétiques à des fréquences allant de quelques Hz à quelques GHz. Elles ont toutes pour but de guider l'information sans perturbation, c'est à dire sans trop d'atténuation ou de déformation.

# Caracteristiques du support de transmission

Les supports de transmission ne sont pas parfait

- Atténuation
- Déphasage
- Bruit
- Écho...

Les défauts du support limitent la transmission

- Débit
- Délai
- Étendu

Adapter les techniques de transmission aux caractéristiques du support

# Signal & Onde

- Un signal est une variation dans le temps d'un phénomène physique.

- La variation se propage dans l'espace en formant une onde –  
Exemple: une vague à la surface de l'eau

En contrôlant les variations on peut transmettre des informations à un destinataire qui observe les variations.

En télécommunications, on crée un signal à l'aide de variations de potentiel électrique ou électromagnétique.

# L'onde sinusoïdale

- L'onde sinusoïdale

- Est le plus simple des signaux
- Est facilement générée
- N'importe quel signal peut être exprimé à partir d'ondes sinusoïdales.

- **$s(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$**

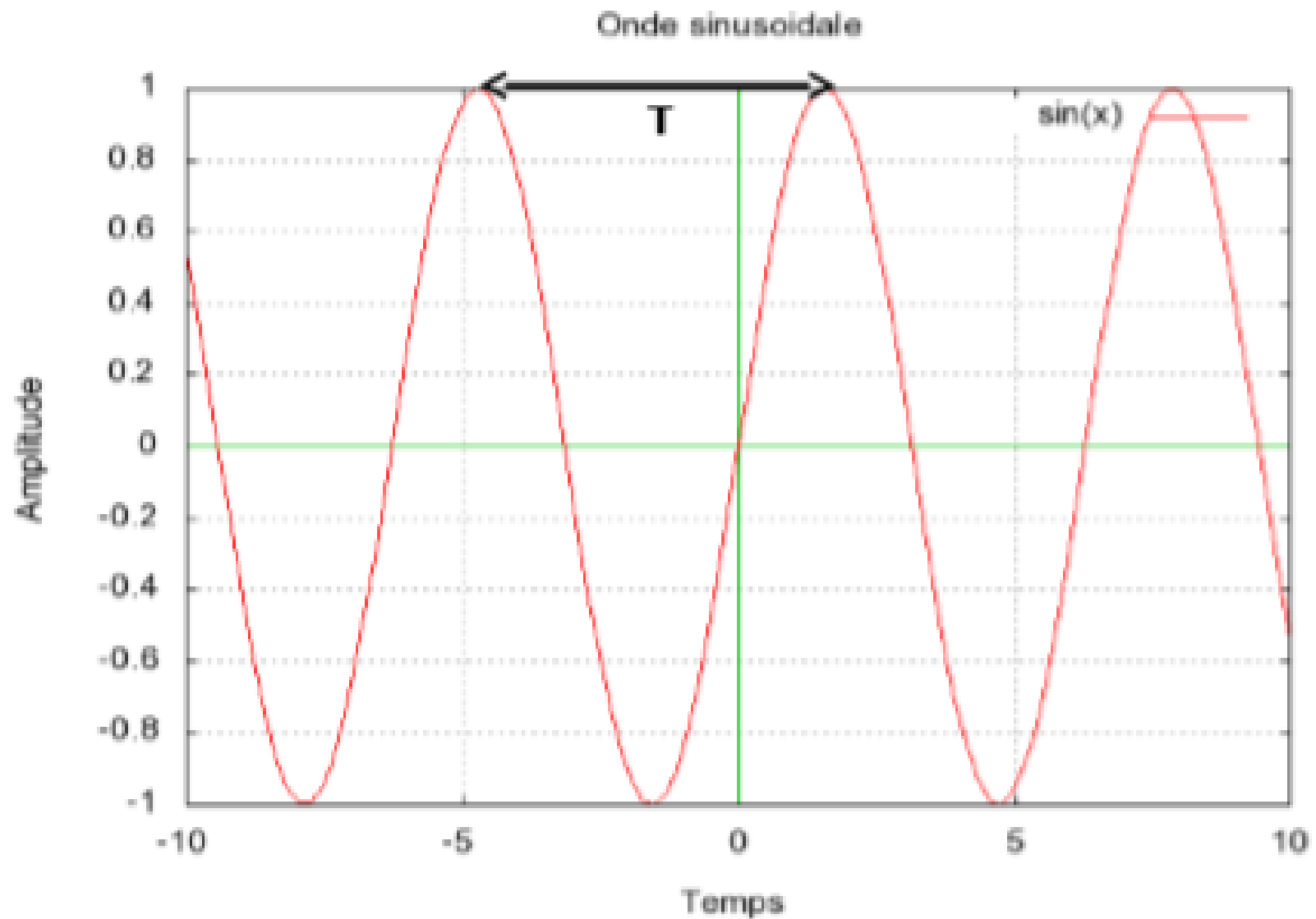
- **A** : Amplitude

- **$\omega$**  : Pulsation =  **$2\pi / T = 2\pi f$**  ; avec **T** = période

- **$\varphi$**  : Phase à l'origine

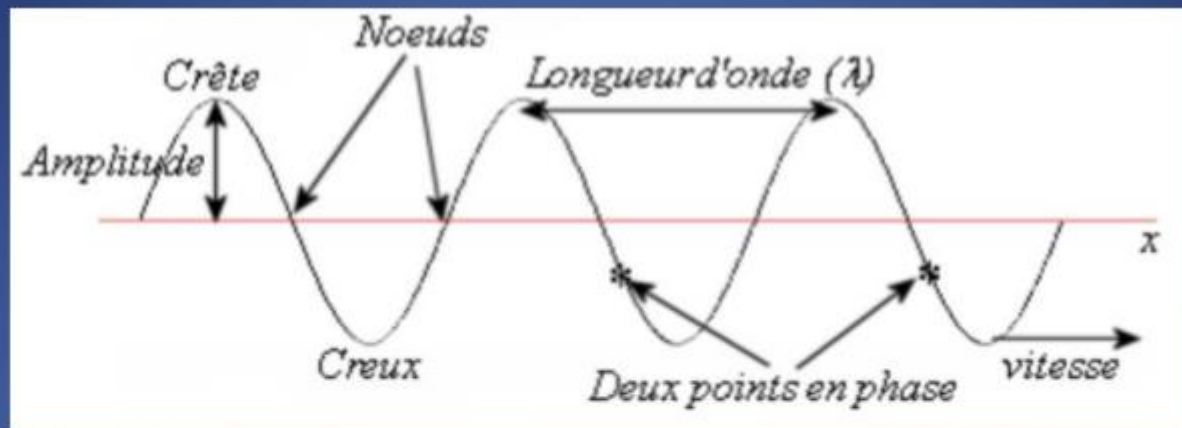
- **$\omega t + \varphi$**  : Phase instantanée

# L'onde sinusoïdale





Pour une onde sinusoïdale, on a les éléments suivants



- ✓ L'**amplitude** ( $A$ ) est la **valeur du déplacement maximum** du milieu.
- ✓ Les **crêtes** sont les **endroits où le déplacement est maximum**.
- ✓ Les **creux** sont les **endroits où le déplacement est maximum, mais négatif**.
- ✓ Les **noeuds** sont les **endroits où le déplacement du milieu est nul**.
- ✓ Les **points en phase** sont des **points qui sont à la même position sur le cycle vibratoire**. Il peut y avoir un ou plusieurs cycles entre ces points en phase. On remarque que toutes les crêtes sont en phase et que tous les creux sont en phase.
- ✓ La **longueur d'onde** ( $\lambda$ ) est la **distance entre deux points en phase les plus près**.
- ✓ L'onde se déplace à une certaine **vitesse** ( $v$ ), déterminée par les caractéristiques du milieu. Peu importe l'amplitude et la longueur d'onde, la vitesse est toujours la même.

La *période de l'onde* ( $T$ ) est le *temps que prendront les particules du milieu pour faire une oscillation complète*.

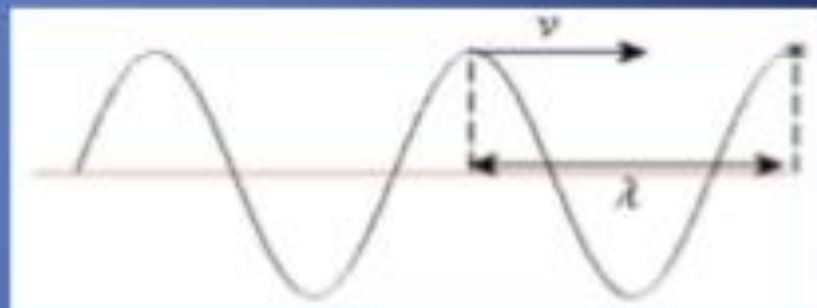
La *fréquence de l'onde* ( $f$ ) est le *nombre d'oscillations que feront les particules du milieu en une seconde*.

Fréquence et période sont bien sûr liée par la relation :

$$f = \frac{1}{T}$$

Pour trouver le *lien entre la longueur d'onde et la fréquence*, on va prendre la situation suivante sur une corde.

La particule au bout du milieu, identifiée par \*, est, à ce moment, au sommet de son mouvement. Avec l'onde qui arrive, elle va descendre puis remonter pour atteindre de nouveau sa position maximale quand la crête suivante arrivera au bout de la corde. La particule aura alors fait un cycle complet.



Cela veut dire que le temps pour faire une oscillation (période  $T$ ) est égal au temps que ça va prendre pour que la crête arrive au bout de la corde. Comme cette crête est à une distance  $\lambda$  et qu'elle arrive avec une vitesse  $v$ , le temps qu'elle prend pour arriver est  $\lambda/v$ . On a donc :

$$T = \frac{\lambda}{v}$$

# Puissance des signaux

- Les signaux ont une puissance relativement faible, mesuré en milliwatt (mW).
- On se réfère le plus souvent aux rapports de puissance: puissance reçue ( $P_{\text{signal reçu}}$  ou  $P_2$ ) par rapport à la puissance envoyé ( $P_{\text{signal émis}}$  ou  $P_1$ )
- Comme ces rapports sont très faibles, on utilise les logarithmes décimaux ( $\log$ ) (à base de 10)
- Ce rapport s'exprime en décibel (dB)

# Les Filters

Filtre passe bas : laisse passer les basses fréquences et atténue les hautes fréquences, c'est-à-dire les fréquences supérieures à la fréquence de coupure

- Filtre passe haut : laisse passer les hautes fréquences et atténue les basses fréquences, c'est-à-dire les fréquences inférieures à la fréquence de coupure.
- Filtre passe-bande : ne laissant passer qu'une bande ou intervalle de fréquences compris entre une fréquence de coupure basse et une fréquence de coupure haute du filtre.



**Bande passante:** la largeur, mesurée en hertz, d'une plage de fréquences  $f_2 - f_1$ .

– Désigne la différence entre la plus haute et la plus basse fréquence du signal

- $\text{Gain} = 10 \log(P_{\text{signal reçu}} / P_{\text{signal émis}})$

- Un support de transmission se comporte généralement comme un filtre passe bande

– Ne laissant passer que les signaux dont les fréquences sont comprises entre une fréquence basse ( $f_b$ ) et une fréquence haute ( $f_h$ )

- La bande passante (capacité) d'un support de communication

– correspond à la plage de fréquences où il présente les meilleures caractéristiques de transmission

- Le ratio Signal/Bruit s'exprime sous la forme d'un Logarithme base 10:  $-SNR(db) = 10 \log(P_{signal} / P_{bruit})$  (parfois noté  $10\log(S/B)$  )

## Formule de Shannon

- **Débit théorique maximum** d'un support soumis à du bruit :

$$D = W \log_2 (1 + P_{signal} / P_{bruit})$$

- Le débit **D** en **bits/s**
- la bande passante **W** en **Hz**
- $P_{signal} / P_{bruit}$  est obtenu à l'aide du rapport signal sur bruit exprimé en décibel **dB**

## Notion de débit binaire et de rapidité de modulation

Deux unités sont employées pour caractériser la vitesse de transmission des réseaux et des lignes de communication. La première est le nombre de bits par seconde (ou débit binaire), la seconde est le baud. Pour mieux comprendre les différences entre ces deux notions, nous nous appuierons au préalable sur quelques définitions : Intervalle significatif : est le temps 'd' pendant lequel une ou plusieurs caractéristiques du signal sont constantes, donc significatives d'un ou plusieurs éléments binaires (bits). L'intervalle significatif correspond également à l'intervalle de temps compris entre deux instants significatifs. Sur la figure 2.9 l'intervalle significatif  $d = T$ . Instant significatif : instant choisi pour l'évaluation du signal transmis (l'instant le plus propices est en général celui correspondant au milieu de l'intervalle significatif). Il correspond à l'instant d'échantillonnage du signal transmis.

**Rapidité de modulation :** On appelle rapidité de modulation (baud rate) le *nombre d'intervalle significatif* du signal par unité de temps. Si ' $\Delta$ ' est la durée de l'intervalle significatif (exprimé en seconde) la rapidité de modulation noté généralement ' $R$ ' est égale à  $\frac{1}{\Delta}$ . L'unité de rapidité de modulation est le *baud*<sup>20</sup>.

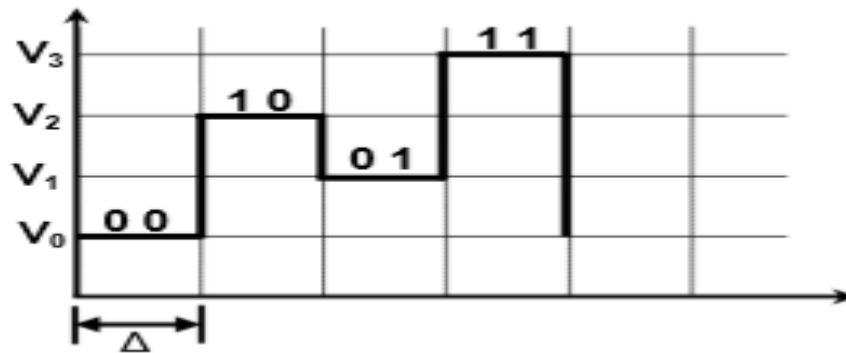
**Débit binaire** : le débit binaire noté ' D ' est le nombre d'éléments binaires (bits) émis par seconde sur le support de transmission. L'unité de débit binaire est le bit par seconde (bit/s ou bps). Si ' T ' est le temps d'un bit on aura donc  $T = 1/D$  bit/s. Exemple, un réseau fonctionnant à 10 Mb/s est donc capable de faire transiter 10 Mb par seconde c'est à dire 10 bits par microsecondes. Le tableau 1 donne les différentes unités de débits.

<i>Notation</i>	<i>Signification</i>
1 bit	0 ou 1
1 kbps (k signifie kilo) ou 1 kb/s	$10^3$ bits par seconde
1 Mbps (M signifie méga) ou 1mb/s	$10^6$ bits par seconde
1 Gbps (G signifie giga) ou 1 gb/s	$10^9$ bits par seconde

Il est en effet possible de transmettre ' n ' bits pendant un intervalle significatif  $\Delta$ , pour ce faire il faut que le signal de données ait  $V=2^n$  valeurs différentes ( $n=\log_2 V$ ). ' V ' est appelé *valence du signal*.



Exemple : si la valence ' V ' du signal est égal à 4, dans ce cas  $n=\log_2 4=2$ , on transmet donc deux bits par intervalle significatif.



00 est représenté par  $V_0$   
 01 est représenté par  $V_1$   
 10 est représenté par  $V_2$   
 11 est représenté par  $V_3$

Sur cet exemple, on peut voir qu'à une amplitude correspondent deux bits, la caractéristique significative du signal est l'amplitude, si le signal à une amplitude constante pendant  $\Delta$ , l'intervalle significatif est  $\Delta$ . Il est clair que le débit binaire  $D$  est double de la rapidité de modulation  $R$ , donc  $D=2 \cdot R$ . En généralisant on aura  $D=n \cdot R=R \cdot \log_2 V$  exprimé en bit par seconde, dans la quel  $D$  est le débit binaire,  $R$  la rapidité de modulation et  $V$  la valence du signal.

Les deux grandeurs précédents (rapidité de modulation et débit binaire) ont des valeurs identiques lorsque l'on transmet des signaux à deux états (c'est à dire des signaux de valence 2).

Peut on *augmenté indéfiniment le débit binaire ' D ' en augmentant la valence du signal transporté* ? La réponse est négative. On ne peut pas augmenter indéfiniment le débit binaire ' D ' car la valence du signal augmente d'autant plus, et le récepteur aura des difficultés à différencier les différentes tensions du signal en tenant compte des bruits qui viennent se superposer à l'information<sup>21</sup>.

En 1948, Claude Shannon a démontré qu'un canal de transmission avait une *capacité maximale* exprimée en bits par seconde.

La capacité maximal d'un canal soumis à un bruit est donnée par la formule de Shannon comme suit :

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

Où : W est la bande passante du canal de transmission exprimé en Hz.

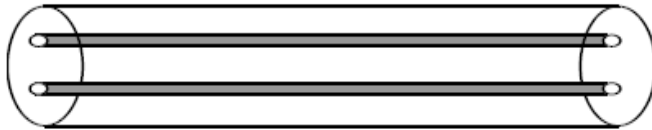
$\frac{S}{B}$  rapport signal sur bruit en dB (cf. 2.2.4).

Il faut toutefois noter que la limite de Shannon est purement théorique. Dans la pratique il est très difficile de s'approcher de cette limite.

# 1. Exemples de ligne

## A. Lignes bifilaires

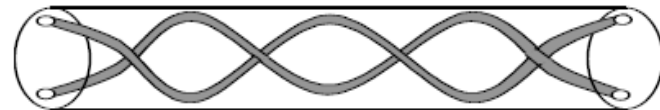
### a. Paires droite :



2 conducteurs filaires parallèles et maintenus à distance constante l'un de l'autre par un isolant. Pertes importantes. Grande sensibilité au bruit. Bande passante faible.

### b. Paires torsadées :

2 conducteurs filaires isolés torsadés. Là aussi une atténuation importante. Moins sensible au bruit. Très utilisé pour le câblage téléphonique et informatique au niveau local.



### c. Paires torsadées blindées :



C'est le même câble que la paire torsadée mais entourée d'une feuille conductrice. Meilleure immunité au bruit que la paire torsadée simple. Elles sont très utilisées pour le câblage des réseaux à 10 et 100 Mbits.

#### d. Câble coaxial :

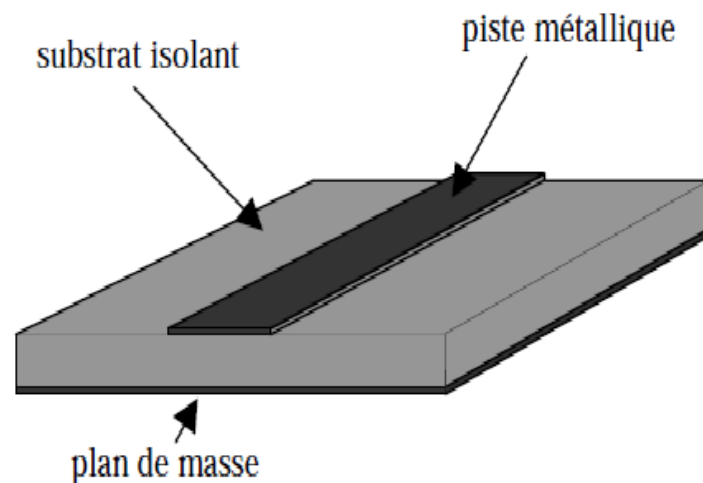
Le conducteur cylindrique extérieur sert de blindage. L'immunité au bruit est donc importante. Les pertes restent grandes et dépendent fortement de la qualité du diélectrique utilisé. La bande passante est importante. Ce type de ligne est utilisé dans le domaine du



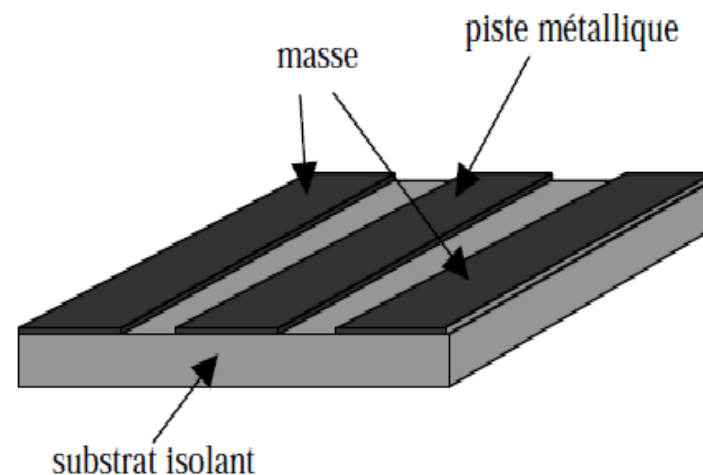
câblage vidéo, informatique, de l'électronique basse fréquence, mais aussi dans le domaine des hyperfréquences jusqu'à plusieurs dizaines de GigaHertz. Pour éviter une atténuation trop importante en hyperfréquence (par exemple à 40 GHz) on utilise des diélectriques spéciaux très onéreux. ( plusieurs centaines d'euros le câble de 50 cm)...

### e. Circuits planaires

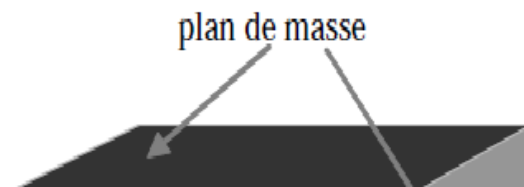
Dans le domaine des hautes fréquences au-delà de quelques 100 MHz, on utilise des lignes spéciales sur les circuits pour relier les "puces" ou les composants entre eux. Elles sont bon marché car elles utilisent la technologie des circuits imprimés. Les différentes géométries existantes sont présentées dans la suite. Les caractéristiques électriques des lignes dépendent des dimensions des métallisations et des caractéristiques des matériaux utilisés (métaux et diélectriques).



Lignes micro-ruban (micro strip)



Lignes coplanaires (coplanar waveguide)



# Guides d'ondes

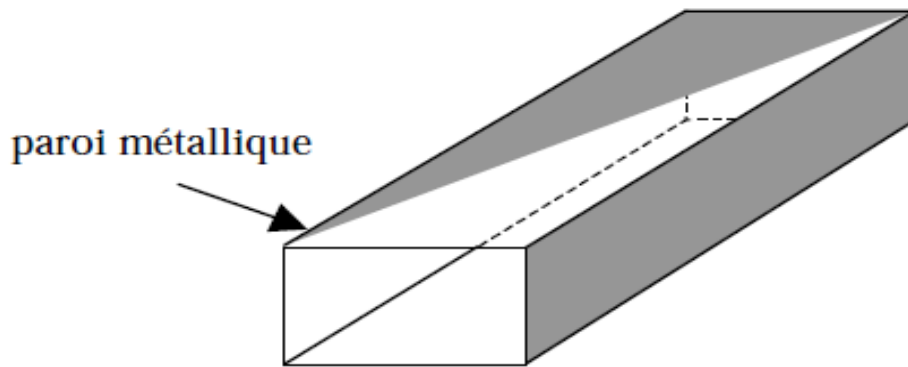
## Guides d'ondes métalliques

Les guides d'ondes métalliques sont des tuyaux creux en général de section rectangulaire ou circulaire.

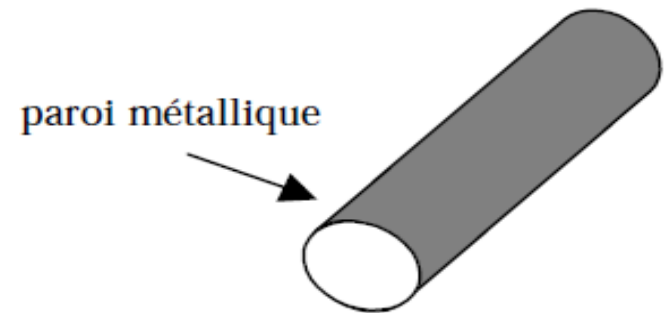
Ceux ci ne contiennent le plus souvent que l'air ambiant qui est un diélectrique qui dissipe très peu les ondes électromagnétiques. Cela explique l'intérêt qu'on leur porte dans les applications très hautes fréquences ( $>50$  GHz) ou de fortes puissances (RADAR, Télécommunications par satellite...).

Il n'y a qu'un seul conducteur, et il ne peut donc pas y avoir de tension (ddp entre 2 conducteurs) qui se

Propage. Ils ne propagent que les ondes électromagnétiques. Ils ont un défaut majeur qui explique qu'on ne les utilise que quand c'est indispensable. La propagation des ondes électromagnétique ne peut s'y faire sans dispersion, c'est à dire sans distorsion des signaux. Cela est dû au mode de propagation qui contrairement aux lignes bifilaires ne peut être un mode TEM (mode de propagation des ondes dans les milieux libres). On peut les utiliser dans tous les domaines de fréquence radioélectriques (qq Hz \_ qq 100GHz), mais ils sont rarement utilisés à des fréquences inférieures à quelques centaines de MHz car leurs dimensions deviennent alors gigantesques.



Guide d'onde rectangulaire



guide d'onde circulaire

# Guides d'ondes diélectriques

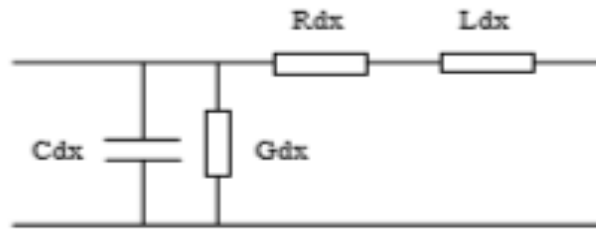
Les guides d'ondes diélectriques sont les fibres optiques. Elles non plus ne peuvent pas propager de tension ou de courant. Elles ne propagent que des ondes électromagnétiques à des fréquences optiques ( $f > 10^{15}$  Hz) qui correspondent aux infrarouges ou à la lumière visible. Leur premier avantage réside dans le fait que la lumière s'y propage quasiment sans perte, ce qui autorise des liaisons sans amplification sur des dizaines de kilomètres. Leur second avantage est leur très grande bande passante de plusieurs GHz. Il est par exemple possible de transmettre des milliers de communications téléphoniques simultanées sur une seule fibre. Les liaisons transatlantiques utilisent ces fibres depuis plus de 20 ans.



# MODELISATION DES LIGNES

## PARAMETRES PRIMAIRES :

Ils dépendent de la coupe transversale de la ligne. Un tronçon élémentaire de ligne de longueur  $dx$  peut être modélisé par le schéma ci contre.  $Z_1 = R + jL\omega \equiv$  Paramètres longitudinaux  $1/Z_2 = G + jC\omega \equiv$  Paramètres transversaux



$R, L, C, G$  sont les paramètres primaires de la ligne de transmission.  $L$  : énergie magnétique emmagasinée (H/m)  $G$  : perte diélectrique dans l'isolant qui n'est pas parfait (S/m) (Siemens/m), c'est la conductance entre les 2 conducteurs.  $C$  : énergie électrique emmagasinée (F/m)  $R$  : pertes ohmiques (conducteur) ( $\Omega/m$ )

$G$  est la perditance ou la conductance transversale due aux pertes diélectriques, son importance croît avec la fréquence selon la relation  $G = \omega C \tan \delta$  où  $\tan \delta$  et  $\delta$  sont respectivement le facteur de perte et l'angle de perte du di

### Cas de la ligne sans perte :

Dans le cas de ligne sans perte,  $R=G=0$ , électrique.

# PARAMETRE SECONDAIRE

Les utilisateurs de ligne préfèrent caractériser les lignes par les paramètres dits secondaires directement mesurables et caractérisant la ligne d'une façon plus concrète.

Un des paramètres très utilisés est l'impédance caractéristique  $Z_c$  qui ne dépend pas de la longueur de la ligne mais seulement de sa forme transversale.  $Z_c$  donne la relation entre la tension et le courant en chaque point de la ligne  $Z_c$  (ceci ne nous intéresse pas beaucoup dans la suite de ce cours) Un autre paramètre intéressant est le coefficient de propagation

$$\gamma = \alpha + j \beta$$

Ce paramètre avec ses composantes  $\alpha$  et  $\beta$  nous informe comment le signal est atténué et déphasé en traversant la ligne :  $\alpha$  = Constante d'atténuation ou atténuation linéique en Np/Km ( $N_p$  = Neper)  $\beta$  = Constante de phase ou déphasage linéique

Pour une ligne uniforme de longueur  $x$ , le coefficient de propagation est :

$$\Gamma = \alpha x + j \beta x$$

# Relation entre paramètres primaires et secondaires

Il faut maintenant donner l'expression de  $\gamma$  en fonction des paramètres primaires de la ligne afin de pouvoir donner une évaluation de l'atténuation et du déphasage.

Dans le cas général d'une ligne avec perte,  $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$

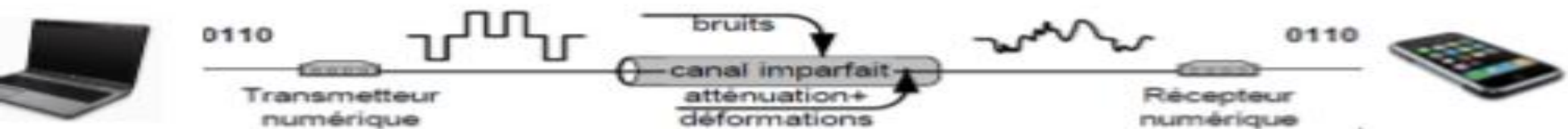
La première constatation est que  $\gamma$  n'est pas constante mais dépend de la fréquence. La deuxième constatation est qu'il n'est pas possible de décomposer son expression sous forme  $\alpha + j\beta$  afin de faire des investigations sur  $\alpha$  et  $\beta$  séparément.

# La numérisation

## Nature des données

Les données à transmettre peuvent être de nature analogique ou numérique

- Analogique: composées de valeurs qui varient de façon continue (température, voix, signal de télévision,...)
- Numérique: composées de valeurs discrètes, c'est-à-dire que les données sont représentées par un ensemble fini ou dénombrable de valeurs distinctes ou séparées (nombres, caractères, pixels,...)



**Nature des données**

**Type de transmission**

# Types de transmission

Pour être transmises sur un canal de communication, les informations doivent être transformées en signaux électriques (ou électromagnétiques).

Bien qu'un signal soit de nature essentiellement analogique, on distingue quand même (abus de langage commode) deux formes de transmission

- Analogique
- Numérique.

## Types de transmission : Analogiques

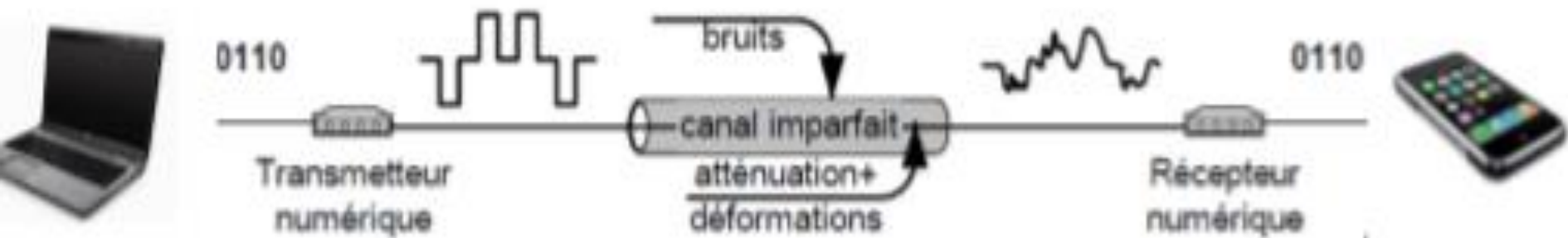
- le signal représente directement la valeur de l'information analogique qu'elle transmet, –soit par les variations de la tension du signal, –de la fréquence du signal –ou par les variations d'une autre caractéristique physique

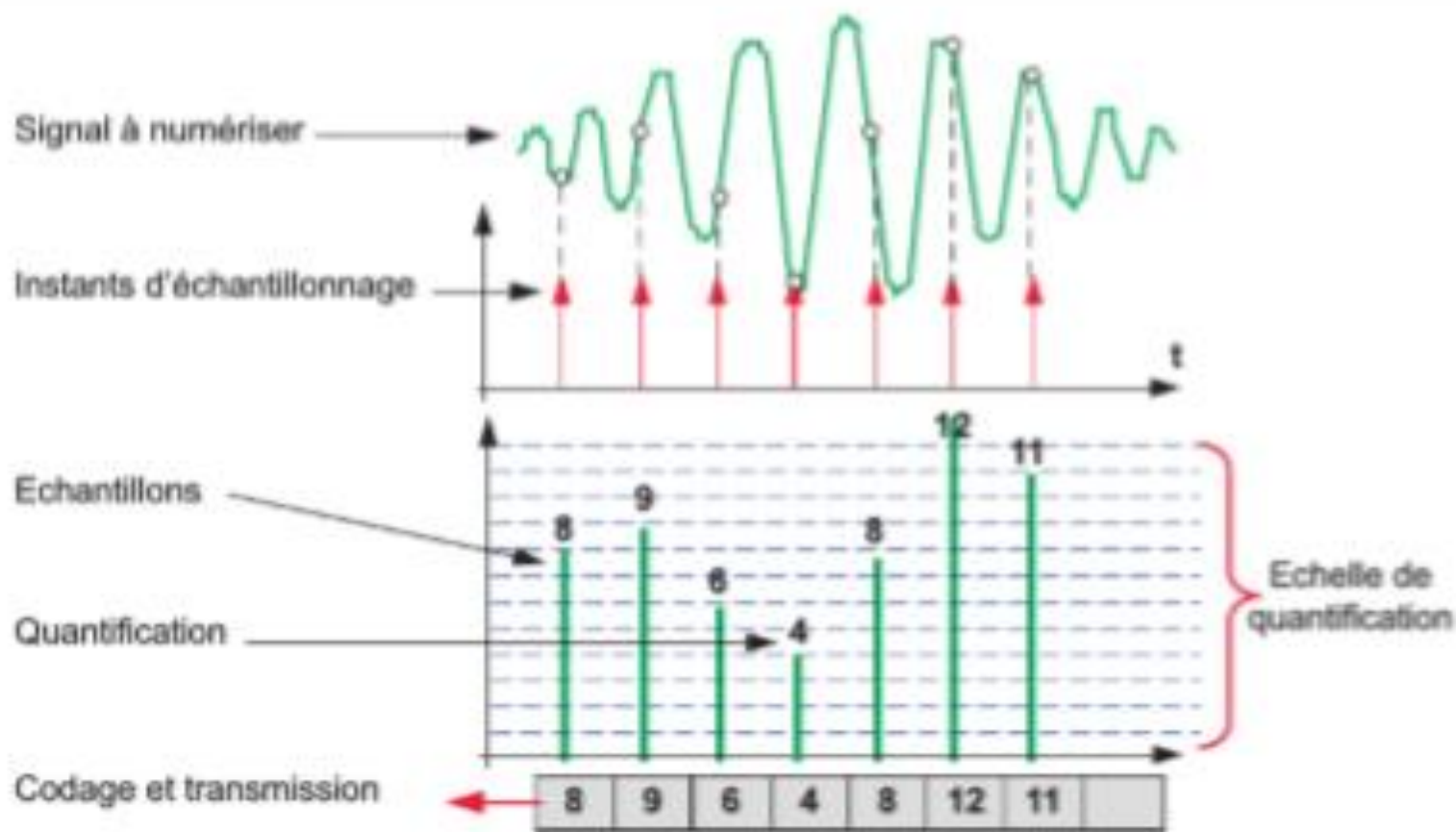
# Types de transmission : Analogiques

- **Transmission analogique d'informations analogiques :**
  - Emission de la parole sur le réseau téléphonique, du son sur les ondes radio, d'images de télévision sur le réseau de télédiffusion,...
- **Transmission analogique d'informations numériques :**
  - Transmission de données informatiques sur des lignes téléphoniques, par satellite,...

# Transmission de données analogique numérisée

- Pour profiter de la robustesse de la transmission numérique, la majorité des compagnies de téléphone ont converti leurs réseaux en remplaçant la transmission analogique par une transmission numérique.
- Pour faire cette conversion, il faut d'abord transformer les signaux analogiques sous une forme numérique à l'aide de trois procédés complémentaires :
  - l'échantillonnage
  - la quantification
  - le codage





Numériser un signal analogique consiste à transformer les grandeurs continues dans le temps en des grandeurs discontinues qui varient par palier en prenant des valeurs à intervalle de temps régulier : période d'échantillonnage  $T_e$ . La numérisation est faite à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique (CAN)



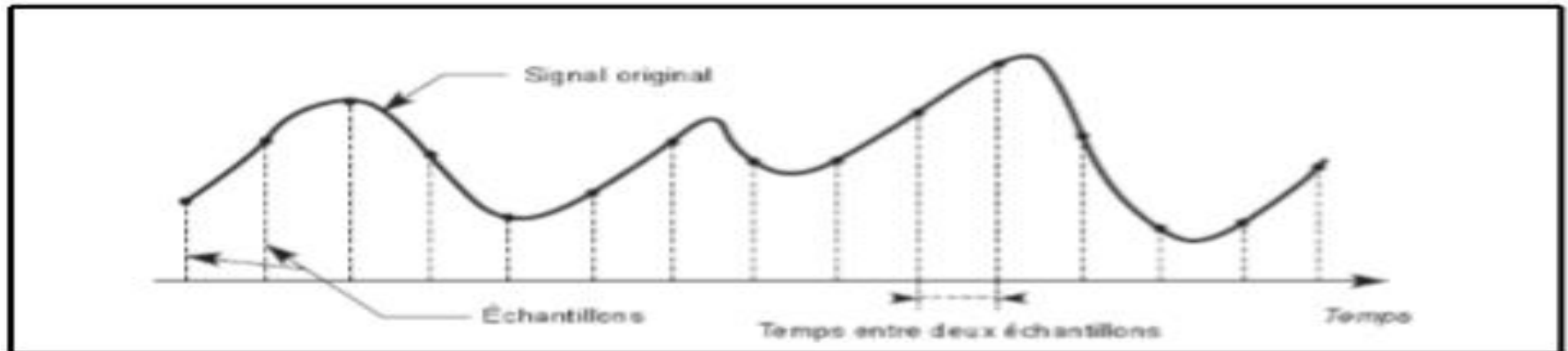
# L'échantillonnage

L'échantillonnage consiste à choisir un certain nombre de moments prédéfinis dans le temps et à observer le niveau de tension du signal analogique à chacun de ces moments

- Les valeurs ainsi observées sont appelées les échantillons.
- Le délai entre les échantillons doit être assez court pour s'assurer de bien observer toutes les variations importantes du signal.
- Pour la voix on échantillonne généralement 8000 fois par seconde.
- Pour reproduire correctement le signal à l'arrivée, le récepteur doit disposer d'un minimum d'échantillons.
- Il existe donc une relation étroite entre la fréquence maximale des variations du signal à discrétiser et le nombre d'échantillons à prélever

# Théorème d'échantillonnage de NyquistShannon

- La fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal, afin de convertir ce signal d'une forme analogique à une forme numérique
- La fréquence d'échantillonnage d'un CD audio, (normalisé à 44,1 kHz)
  - L'oreille humaine peut capter les sons jusqu'à 16 kHz, quelquefois jusqu'à 20 kHz.
  - Il convient donc, lors de la conversion, d'échantillonner le signal audio à au moins 40 kHz



# La quantification

Pour compléter le processus de numérisation du signal on attribue à chaque échantillon un nombre entier qui représente le plus fidèlement possible le niveau de tension observé, c'est la quantification.

- La quantification fait perdre un peu de précision, plus ou moins selon la finesse de la grille d'attribution des nombres.
- Pour la voix, on utilise normalement une grille à 256 niveaux (les nombres ont donc 8 bits).

Consiste à représenter un échantillon par une valeur numérique au moyen d'une loi de correspondance.

- Il convient de trouver cette loi de correspondance de telle sorte que la valeur des signaux ait le plus de signification possible.
- Si tous les échantillons sont à peu près égaux, il faut essayer, dans cette zone délicate, d'avoir plus de possibilités de codage que dans les zones où il y a peu d'échantillons.

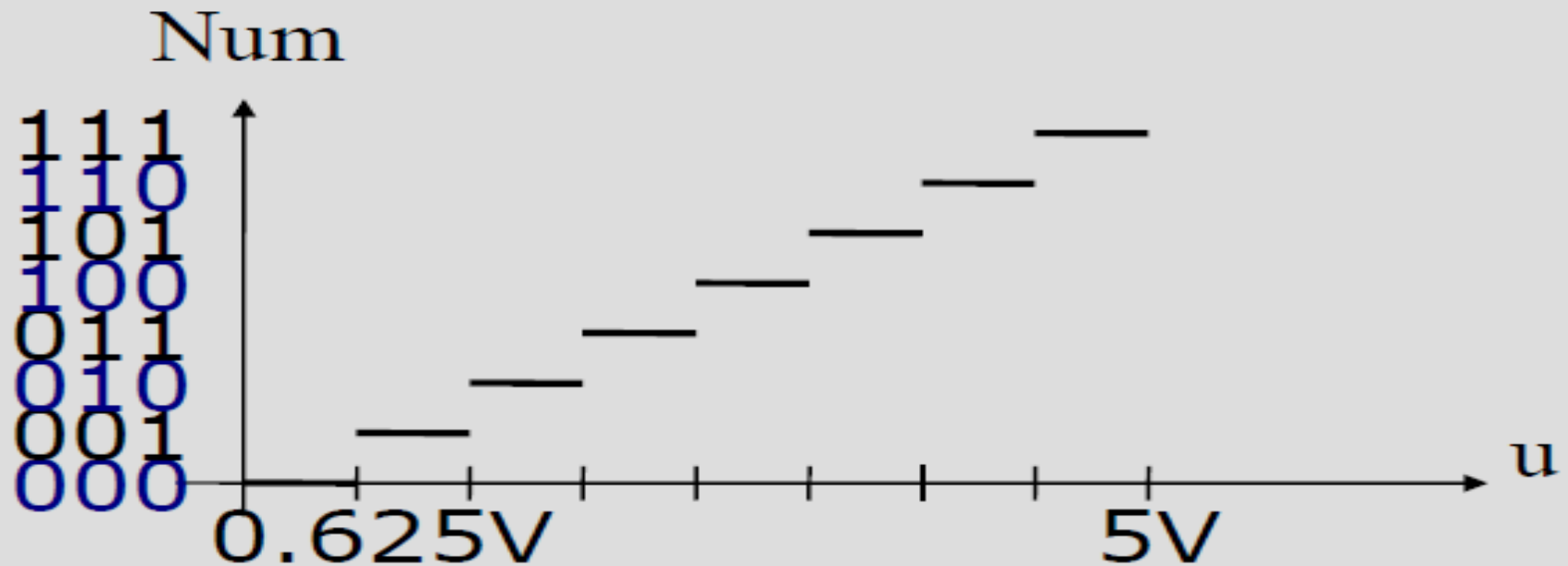
Cette quantification est assurée par un convertisseur (CAN). Chaque valeur est arrondie à la valeur permise la plus proche par défaut.

On appelle alors **résolution ou pas** l'écart (constant) entre deux valeurs permises successives.

Numérisation sur  $n = 3$  bits,

– d'où  $N = 2^3 = 8$  niveaux,

– pas de quantification  $q = \Delta U / N$



La résolution du convertisseur est le nombre  $n$  de bits sur lequel sont codés les niveaux de tension ;

- Le pas de quantification est appelé quantum.

C'est la plus petite variation de tension que le convertisseur peut coder.

- A une tension  $u$  correspond un nombre numérique  $\text{Num}$ .

### Résolution : $n$

- Nbre de niveaux (valence) :  $N = 2^n$

- Quantum :  $q = \Delta U / N = \Delta U / 2^n$

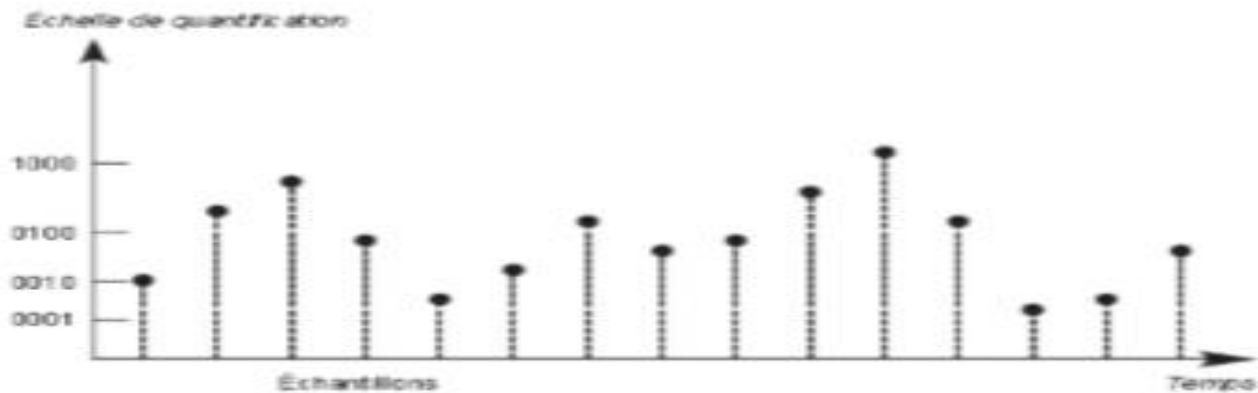
- Valeur de  $\text{Num}$  :

- $\text{Num } q < u < (\text{Num} + 1) q$

- $\text{Num} = \text{Partie entière } (u/q)$

# Codage

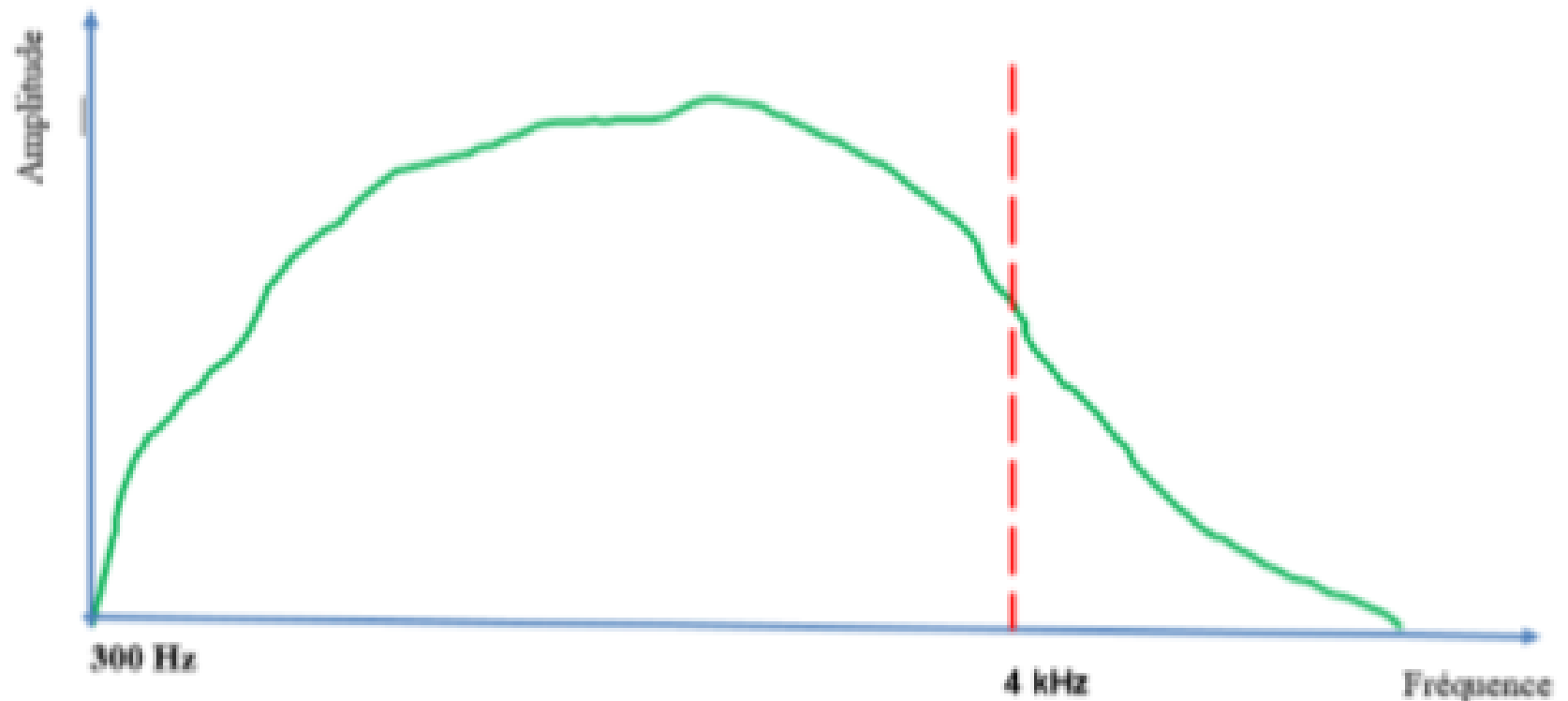
- **Consiste à affecter une valeur numérique aux échantillons.**
- **Ce sont ces valeurs qui sont transportées dans le signal numérique**



## 1. Le filtrage

La bande passante nécessaire pour transmettre la voix humaine pour qu'elle puisse être correctement comprise est: 300 - 3400 Hz. Avant l'échantillonnage et la numérisation, le signal Basse Fréquence traverse un filtre qui limite la fréquence du signal à 4000 Hz

L'image ci-dessous illustre la limitation de la fréquence.



# Numérisation de la parole téléphonique

- La numérisation de la parole téléphonique s'effectue généralement au moyen des méthodes classiques
  - PCM (Pulse Code Modulation) en Amérique du Nord
  - MIC (modulation par impulsion et codage) en Europe
- Ces méthodes présentent de légères différences, dont la plus visible concerne le débit de sortie
  - 56 Kbit/s en Amérique du Nord
  - 64 Kbit/s en Europe
- Le codage s'effectue soit sur 128 valeurs (PCM), soit sur 256 valeurs (MIC), ce qui demande, en binaire, 7 ou 8 bits de codage.
- Débit de la numérisation de la parole téléphonique est obtenue en multipliant le nombre d'échantillon/section par le nombre de bits.
  - $8\,000 \times 7 = 56$  Kbit/s en Amérique du Nord
  - $8\,000 \times 8 \text{ bit/s} = 64$  Kbit/s en Europe.



# Numérisation de la parole téléphonique

- La largeur de bande de la parole téléphonique analogique est de 3 200 Hz.

Pour numériser ce signal correctement sans perte de qualité, déjà relativement basse, il faut échantillonner au moins 6 400 fois par seconde.

—Dans la normalisation, on a adopté la valeur de 8 000 fois par seconde.

L'amplitude maximale permise se trouve divisée en 128 échelons positifs pour la version PCM —auxquels il faut ajouter 128 échelons négatifs dans la version européenne MIC.

# Pixellisation

Une image numérique est un ensemble discret de points appelés Pixels (contraction de PICTure ELelements). Elle a pour vocation d'être affichée sur un écran.

Chaque pixel possède une couleur.

Pour fabriquer une image numérique (à partir d'un appareil photo, scanner, caméra numérique), il faut des capteurs qui sont de petites cellules photoélectriques placées en quadrillage.

L'appareil découpe l'image en un quadrillage ou trame. Chaque case est un pixel.

Le pixel est une portion de surface élémentaire permettant d'échantillonner spatialement une image. A chaque pixel est affecté un nombre binaire correspondant à la couleur de la case.

**Definition 6 :** On appelle **définition** d'une image, le nombre de pixels qui la compose. Par exemple pour une image de 640 colonnes sur 240 lignes, l'image est composée de :

$$640 \times 240 = 153\,600 \text{ pixels}$$

**Definition 7 :** On appelle **taille** d'une image, le produit de sa définition par le nombre d'octet par pixel. Par exemple une image RGB de 640 colonnes sur 240 lignes, la taille de l'image est de :

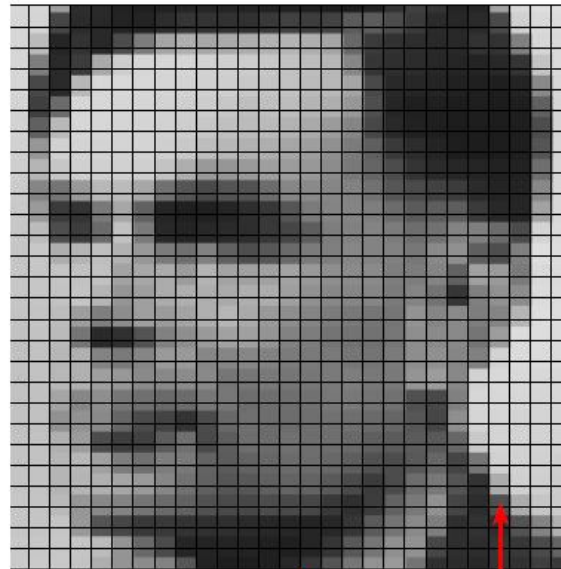
$$640 \times 240 \times 3 = 460\,800 \text{ octets}$$

# Codage en niveaux de gris

Chaque cellule du capteur mesure l'intensité lumineuse moyenne correspondant au pixel.

L'intensité lumineuse, grandeur analogique, est convertie par la cellule en un signal analogique sous forme de tension électrique.

Elle est ensuite quantifiée, puis numérisée. A chaque valeur d'intensité lumineuse correspond un niveau de gris codé numériquement.



Un système à 4 bits permet de coder  $2^4 = 16$  niveaux de gris.

Un octet (8 bits) permet, lui, de coder pour chaque pixel  $2^8 = 256$  niveaux de gris. La valeur numérique codant l'intensité lumineuse et la position du pixel sont stockées dans la mémoire. L'image est reconstruite par l'ordinateur à partir des données collectées et numérisées.

# Réseau de Transmission :PDH, SDH, D-WDM

Le réseau de transmission fournit les capacités de transport des flux voix, vidéo, données générés par le réseau 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 2Mbit/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 (E1), 8 (E2), 34 (E3), 140 (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 Transfert 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).

## Le réseau 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 de 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  $E_i$  avec  $E_1$  correspondant à 2 048 kbit/s,  $E_2$  correspondant à 8 Mbit/s,  $E_3$  correspondant à 34 Mbit/s,  $E_4$  correspondant à 140 Mbit/s (le plus haut débit normalisé) et  $E_5$  correspondant à 560 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  $T_i$  avec  $T_1$  à 1,544 Mbit/s,  $T_2$  à 6,312 Mbit/s,  $T_3$  à 44,736 Mbit/s et  $T_4$  fonctionnant à 274,176 Mbit/s.

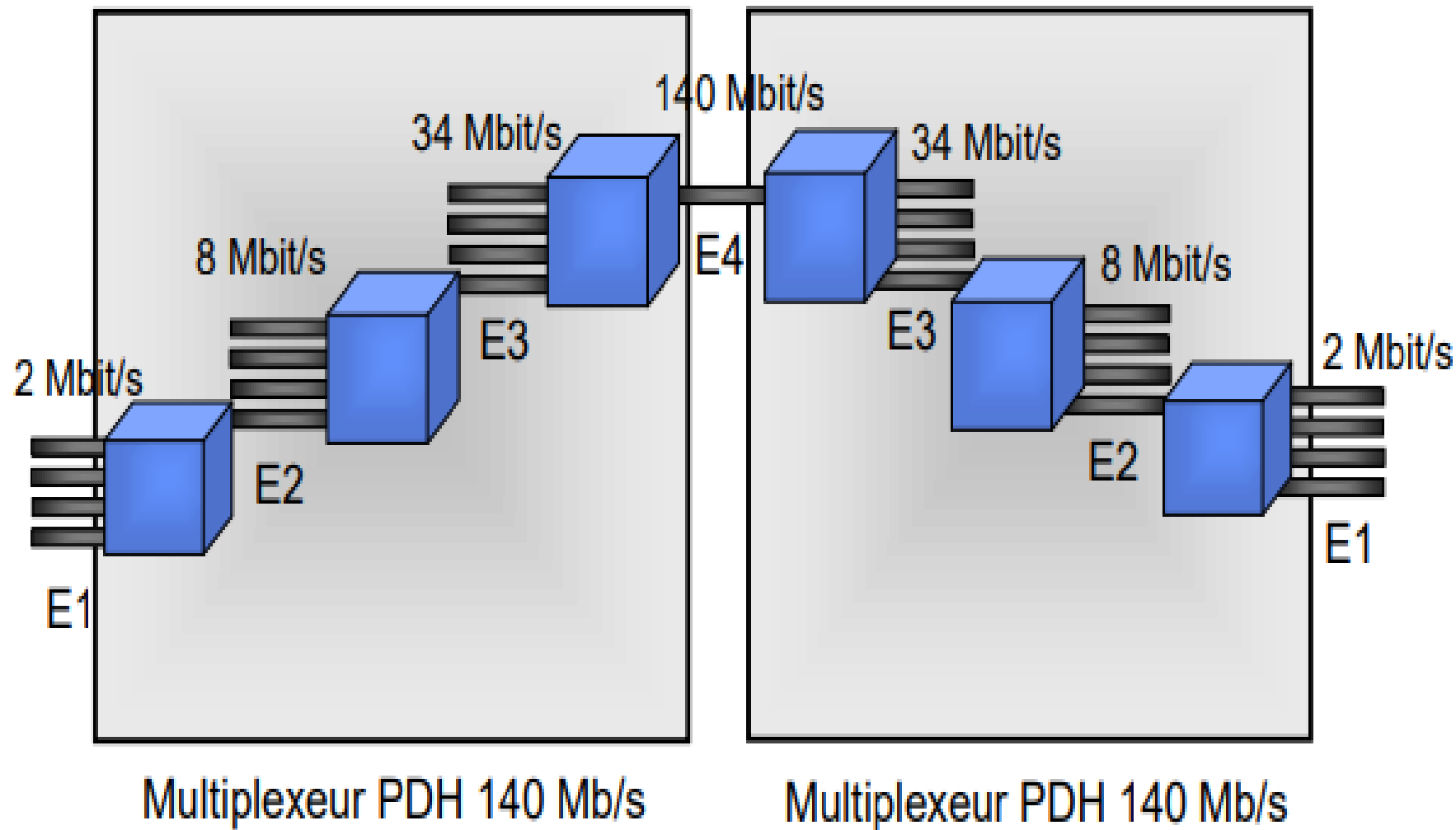


Figure 1 : Multiplexage PDH

Un premier niveau de multiplexage appelé MIC-E2 ou TN2 multiplexe 4 signaux à 2,048Mbit/s pour obtenir un signal multiplex secondaire 8 Mbit/s. 4 de ces multiplex secondaires peuvent à leur tour être multiplexés pour donner des multiplex tertiaires MIC-E3 à 34Mbit/s. Puis 4 multiplex peuvent être surmultiplexés en MIC-E4 à 140 Mbit/s. Le dernier multiplex MIC-E5 multiplexe 4 signaux MIC-E4 à 140 bit/s pour donner du 565Mbit/s, et le transmet par fibre optique sur des distances d'au plus 4 multiples de 23km (~92km). Ces liaisons interurbaines assuraient la liaison entre les principales villes de province jusqu'à la fin de l'année 2000. Par définition le passage à l'ordre de multiplexage supérieur  $n+1$  consiste à multiplexer ensemble 4 multiplex d'ordre  $n$ .



L'ensemble des multiplex de différents niveaux (ordre) s'appelle une hiérarchie. Cette hiérarchie de multiplex successifs est dite PDH (Plésiochrone Digital Hiérarchy). Le multiplexage s'y fait bit à bit et non pas mot par mot. Les systèmes de multiplexages de la hiérarchie plésiochrone

traitent chaque affluent de manière totalement transparent comme des flux de bits dont ils ignorent la structure.

### **Trame secondaire TN2 - MIC- E2:**

La trame secondaire TN2 correspond à la norme G742 de l'ITU-T. La trame secondaire dure  $100,4\mu s$  et est longue de 848 bits, qui se décompose de la manière suivante : 4 groupes de 212 bits chacun. Il faut remarquer tout d'abord que 848 bits ne correspond pas à  $4 \times 8 \times 30 = 960$  bits. Nous allons expliquer pourquoi:

<i>Groupe I</i>		<i>Groupe II</i>		<i>Groupe III</i>		<i>Groupe IV</i>	
12	200	4	208	4	208	4	208

*Figure 9 : Trame de multiplex E2*

# PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA SDH

Les concepts de la SDH répondent à un certain nombre d'objectifs qui sont la flexibilité, la visibilité, la facilité d'exploitation, la prise en compte des évolutions futures vers les hauts débits et l'interconnexion des systèmes :

- La flexibilité d'un système de multiplexage se mesure d'une part à la facilité de réorganisation du train résultant et d'autre part à la possibilité de transporter dans ce train des débits variés.

- Le principe de multiplexage retenu pour la SDH est le multiplexage synchrone. Ce type de multiplexage procure une visibilité directe des signaux transportés à l'intérieur d'une trame à 155Mbit/s. On peut alors extraire ou insérer des affluents, réorganiser le multiplex sans effectuer l'ensemble des opérations de multiplexage/démultiplexage.

De plus il est possible de transmettre dans une trame synchrone des débits non normalisés G703 par exemple : TVHD ou ATM.

- Les multiplexeurs de la hiérarchie plésiochrone actuelle disposent de quelques éléments binaires de réserve qui peuvent être utilisés pour effectuer des contrôles de qualité entre deux équipements de multiplexage d'un même niveau.

Cependant le débit équipements de multiplexage d'un même niveau. Cependant le débit disponible reste faible et limite les possibilités d'exploitation et de maintenance.

D'autre part, il n'est pas utilisable par les systèmes de ligne. Le fait que la SDH soit essentiellement orientée vers la transmission sur fibres optiques a permis de diminuer les contraintes de débit. Une part relativement importante du débit peut donc être réservée aux différentes fonctions d'exploitation maintenance, elles existent aux différents niveaux définis dans la SDH.

- Dans la hiérarchie plésiochrone, la normalisation d'un nouveau débit de transmission au niveau N de la hiérarchie se traduit par la définition d'une jonction au nouveau débit de transmission et d'une trame de multiplexage des signaux de niveau N-1. Les systèmes de surveillance des équipements de transmission sont spécifiques aux constructeurs qui définissent les codes ou trames de ligne, le type d'embrouillage...

Dans la SDH les trames haut débit sont construites par multiplexage synchrone d'une entité de base. Cette entité de base définit donc implicitement toutes les trames haut débit n'étant en principe que technologique. Chaque trame est obtenue en rajoutant un sur débit de gestion au multiplexage des entités de base.

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 SONET, les niveaux sont classés en OC : Optical Contener. Pour la norme SDH, les niveaux sont organisés hiérarchiquement en STM - n (Synchronous Transport Module, niveau n). La hiérarchie de la norme SDH correspond à celle de SONET.

Le niveau 1 de SDH (155,52 Mb/s) est le niveau 3 de SONET et le niveau 2 de SDH (622,08 Mb/s) est le niveau 12 de SONET. 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 plésiochrones (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 sur laquelle il est possible d'utiliser un multiplexage WDM (multiplexage en longueur d'onde).

La technologie SDH est donc, souvent, couplée à une technique WDM quand elle relie deux ADMs (Add and Drop Multiplexers) distants. Ceci permet de ne pas avoir à multiplier le nombre de fibres entre 2 localités. 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 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.

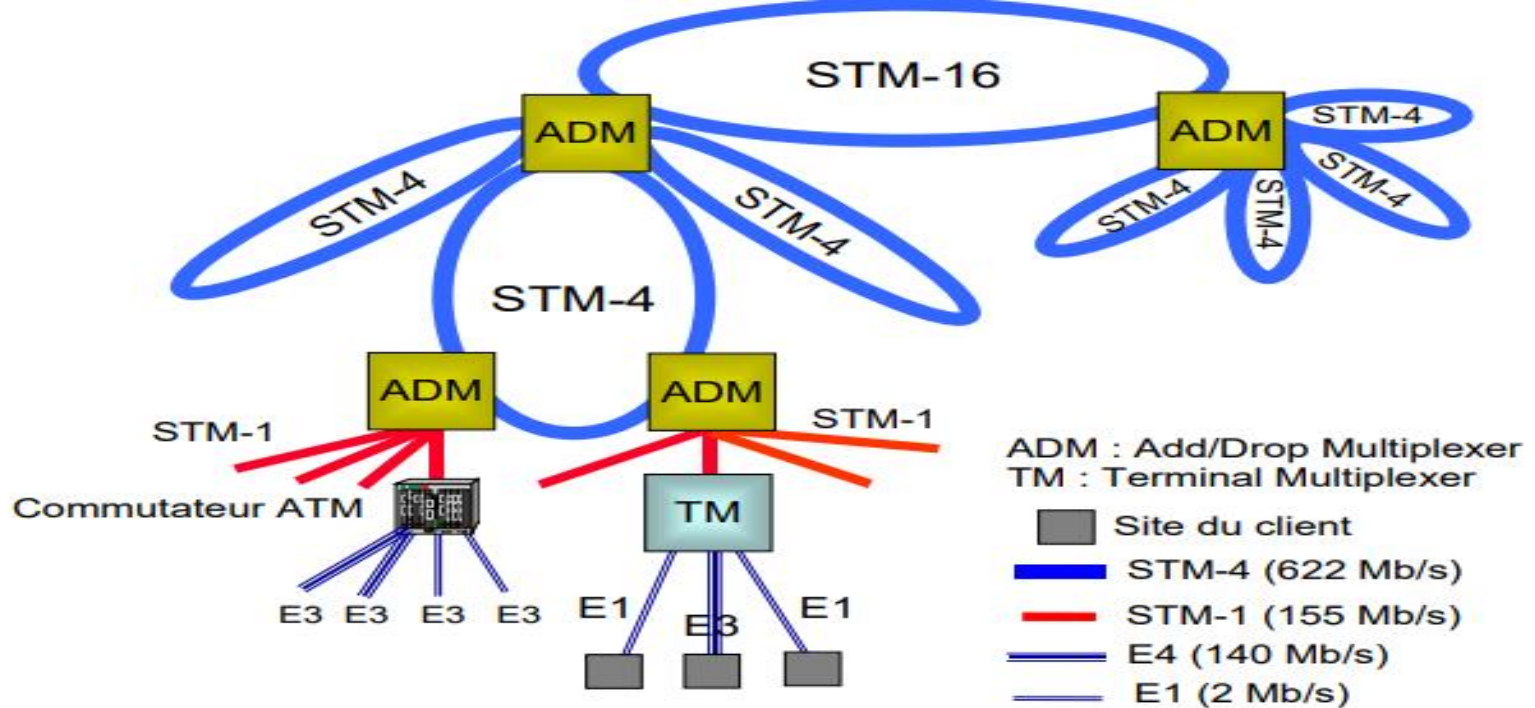


Figure 2 - Exemple de réseau SDH

Niveau SONET Débit correspondant en Kbit/s

STS - 1 51.840

STS - 3 155.520

STS - 12 622.080

STS - 48 2.488.320

STM : Synchronous Transport Module

Niveau SDH Débit correspondant en Kbit/s

STM - 1 155.520

STM - 4 622.080

STM - 16 2.488.320

STM - 64 9.953.280

# La trame SDH

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 Transfert Module 1' est structurée en octet et est divisée en trois zones dévolues aux informations suivantes :

La trame de base, appelée STM-1 'Synchronous Transfert Module 1' est structurée en octet et est divisée en trois zones dévolues aux informations suivantes :

- Capacité Utile ('Payload') qui est l'information utile, c'est-à-dire celle de l'utilisateur.
- Les pointeurs
- Le surdébit de section (SOH='Section OverHead') qui est réservée à l'exploitation et à la maintenance. En effet, l'exploitation et la maintenance nécessitent l'utilisation de données de services, bits ou octets supplémentaires qui accompagnent les données. Elles entraînent une augmentation de débit.

Le signal utile, c'est-à-dire l'affluent est projeté dans une enveloppe adaptée au débit du signal et à la structure de la trame, appelé Conteneur.



# Le Conteneur (Cn)

Le conteneur Cn est une entité sous forme de blocs d'octets dont la capacité est dimensionnée pour assurer le transport d'un des différents débits affluents à la SDH définis par le CCITT. Le conteneur joue le rôle de régénération du signal plésiochrone de départ, il récupère l'horlogeNet transforme le code de transfert selon les débits entrants. Le " n " de **Cn** dépend du débit entrant, par exemple

Dénomination	Débit entrant (Mbits/s)
C11	1.544
C12	2.048
C3	34.368 ou 44.736
C4	139.264

- **C4** : Après récupération des données provenant d'un signal à 140 Mbit/s (ATM ou TN4 de la PDH) le C4 est élaboré en positionnant ces données dans un paquet de 180 blocs ( $9 \times 20$ ) chacun constitué de 13 octets. ( $9 \times 20 \times 13 \times 8$  bits = 18720 bits en 125  $\mu$ s soit 149, 760 Mbit/s > 139264 Kbit/s ce qui laisse des bits libres pour une éventuelle justification).
- **C3** : Il est élaboré à partir d'affluents à 34 Mbit/s provenant du multiplex tertiaire TN3 de la PDH. Les données récupérées sont placées dans un conteneur de 756 octets ( $9 \times 84$  octets) soit un total de ( $9 \times 84 \times 8$  bits en 125  $\mu$ s = 6048 bits en 125  $\mu$ s = 48, 384 Mbit/s)
- **C12** : La figure ci dessous illustre l'organisation du C12 pour un affluent à 2 Mbit/S :

Le conteneur contient donc un paquet de données utiles (payload) arrivés au rythme du débit de l'affluent, plus un certain nombre d'octets de bourrage dont le rôle est d'adapter le débit incident à la structure de la trame.

Ce conteneur est transporté dans le réseau de transmission SDH, le chemin dans le réseau entre le point d'entrée et le point de sortie, constitue ce qu'on appelle un conduit ('path'). Une des propriétés essentielles de la SDH est de pouvoir gérer ce conteneur (indépendamment de son contenu) et son conduit à travers le réseau. A cette fin, des bits de gestions appelés POH (surdébit de conduit) sont ajoutés au conteneur. L'ensemble constitue ce qu'on appelle un conteneur virtuel.

# Le conteneur virtuel : VCn (Virtual Container):

Le conteneur virtuel VCn est alors obtenu à partir du conteneur en lui ajoutant un entête (PATH OVER HEAD = POH) utilisé pour la gestion du conteneur (routage, concaténation, justification...).

Les VCn sont des éléments de bases transportés par le réseau SDH, ils seront multiplexés pour obtenir des blocs plus grands et ainsi de proche en proche jusqu'à l'obtention d'une trame de base STM-1 constitué de 2430 octets.

Le conteneur virtuel VC est une entité gérée par le réseau SDH.



## **L'unité d'affluent : TUn (Tributary Unit)**

Pour pouvoir remplir un VC avec un affluent et le projeter dans la trame SDH, tout en

Pouvant le localiser immédiatement, la SDH utilise un pointeur, c'est-à-dire une adresse.

L'idée est de ne pas placer le conteneur à un endroit précis dans la trame, ce qui nécessiterait des mémoires-tampons pour synchroniser, mais d'indiquer dans une zone mémoire (pointeur), l'adresse relative du conteneur par rapport au début de la trame. Pratiquement, le VC flotte donc à l'intérieur des trames et est le plus souvent en chevauchement sur deux trames consécutives. Ce pointeur est nécessaire car les Tus sont construites à l'aide d'horloge SDH qui est indépendante de celles des affluents, le début d'une TU ne coïncide pas forcément avec celui d'un VC. La valeur de ce pointeur indique l'emplacement du VCn dans la trame de transport. Ce pointeur est associé au processus de justification du VC dans la trame de transport, c'est à dire que la position du VC dans la trame peut changer si il y a justification.

Le pointeur a donc deux fonctions importantes : Rattraper le déphasage des trames synchrones (justification) et assurer la synchronisation des trames asynchrones.



## La structure de base : STM1

Pour la STM-1, La trame comporte 270 colonnes de 9 octets, expédiées toutes les 125  $\mu$ s, soit 8000 par seconde ou un débit de 155,520 Mbit/s. 9 colonnes d'octets sont réservées à la gestion de la section de multiplexage qui a donc une "charge utile" (payload) de 2349 octets (9 lignes et 261 colonnes).

L'originalité de la technique SDH est l'utilisation de "pointeurs" et de la "justification" positive, négative ou nulle, permettant de préserver l'intégralité et la visibilité des affluents. Le pointeur repère à chaque instant l'adresse de l'information utile dans la trame STM-n.

La trame de base est donc caractérisée par :

- sa longueur 2430 octets,
- sa durée 125  $\mu$ s, son débit 155,520 Mbit/s,
- sa capacité utile 2349 octets.

Elle se décompose en trois zones représentées ci-dessous :

- surdébit de section, divisé en surdébit pour la section de régénération ou RSOH et surdébit de section de multiplexage ou MSOH,
- les pointeurs d'AU,
- les charges utiles VC 4, une pour STM 1, 4 pour STM 4 ou 16 pour STM16.

# WDM

L'utilisation de la SDH et de la fibre optique a apporté un début de réponse à la demande de bande passante. Toutefois, la SDH utilisant une seule longueur d'onde comprise entre 1330nm et 1550 nm, la bande passante de la fibre optique n'est pas exploitée complètement. Pour amplifier fortement l'utilisation de la bande passante, des technologies photoniques complètent le réseau de transport SDH. La technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) multiplexe 8, 16, 32 à 64 longueurs d'onde dans une seule fibre (équivalent à un multiplexage en fréquences). Chaque longueur est espacée de 0.8nm voir 0.4nm. La plage des longueurs d'onde utilisée est comprise entre 1530 et 1565 nm car elle permet une meilleure stabilité du

Faisceau lumineux et une faible dispersion chromatique. Les opérateurs peuvent ainsi transporter plusieurs flux SDH STM16 à 2,5Gbits ou STM64 à 10Gbits (ou autres par exemple FDDI) sur une fibre optique. Les débits obtenus sont de l'ordre seconde. En multiplexant 16 STM64 dans de la fibre, on obtient 2 millions de communications téléphoniques simultanées. Le WDM est utilisé depuis plusieurs années dans les réseaux de transmission SDH trans-océaniques tels TAT12/13, AFRICA ONE, FLAG, SEA ME WEA. Cette technologie est maintenant utilisée au niveau des réseaux de transmission SDH terrestre. Pour un opérateur, le WDM permet un gain au niveau coût des travaux de génie civil pour car il permet d'éviter la pose de nouvelles fibres optiques. Avec le WDM, une nouvelle couche optique apparait dans les réseaux des différents opérateurs. Dans les prochaines années, nous verrons apparaître des commutateurs optiques qui permettent de brasser les différentes longueurs d'onde. Ils permettent ainsi aux opérateurs de bâtir des réseaux maillés tout optique.