

Chapitre 1. Caractéristiques des supports de transmission (3 Semaines)

Bandé passante, atténuation, sensibilité aux bruits, impédance caractéristique, coefficients de réflexion, de transmission et rapport d'onde stationnaire (TOS), Utilisation de l'abaque de Smith.

Chapitre 1

Caractéristiques des supports de transmission

1. Introduction

L'infrastructure d'un réseau, la qualité de service offerte, les solutions logicielles à mettre en œuvre, dépendent largement des supports de transmission utilisés. Les supports de transmission exploitent les propriétés de conductibilités des métaux (paires torsades, câble coaxial) ou celles des ondes électromagnétiques (faisceau hertzien, guide d'ondes, satellites), ou encore celle du spectre visible de la lumière (fibre optique). Dans cette partie, nous allons passer en revue quelques caractéristiques essentielles des supports de transmission sachant que les possibilités de transmission (débit, taux d'erreurs, distance franchissable,...) dépendent essentiellement des caractéristiques et de l'environnement de celui-ci.

Généralement, on classe les supports de transmission en deux catégories :

- Les supports guidés (supports cuivre et supports optiques) ;
- Les supports libres (faisceaux hertziens et liaisons satellites).

La complexité des systèmes provient généralement du fait qu'une liaison peut emprunter différents supports (figure 1). Le système de transmission devra alors réaliser l'adaptation du signal à transmettre à chaque type de support utilisé. Les caractéristiques des supports diffèrent selon la nature physique de celui-ci et du mode de propagation choisi. Cependant, certaines caractéristiques sont communes à tous les types de support (bande passante...), d'autres sont spécifiques (impédance caractéristique...). Les supports sont à l'origine de nombreux problèmes de transmission, aussi il est important de bien en connaître les caractéristiques pour en comprendre l'utilisation et prévenir les différents problèmes d'exploitation pouvant survenir.

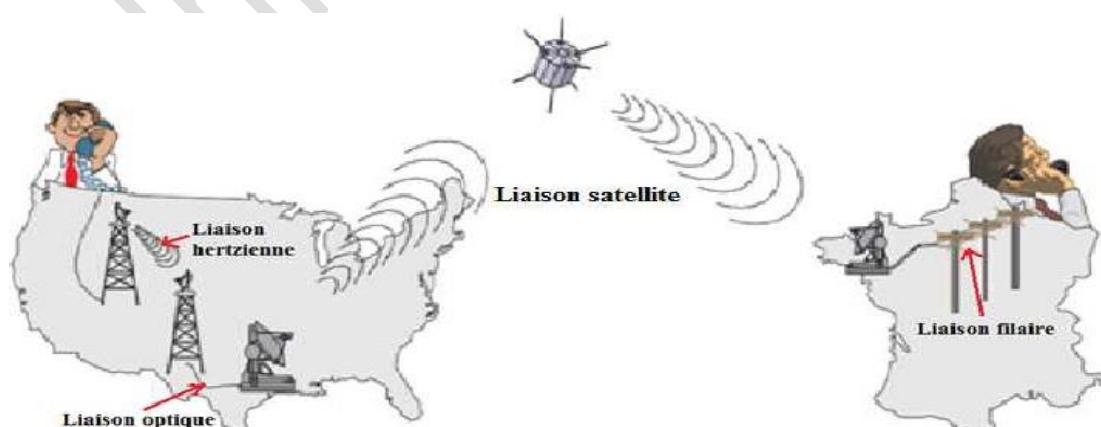


Fig. 1: Une liaison de transmission mette en œuvre plusieurs types de support.

2. Support de transmission :

Le support de transmission (Ligne ou canal de transmission) est un ensemble de deux ou plusieurs conducteurs acheminant de concert un signal électrique, d'une source (ou émetteur vers une charge (ou récepteur).

Le support de transmission au sens de la propagation, est la portion du milieu physique utilisée pour la transmission particulière étudiée.

Le canal de transmission, au sens de la théorie de communication inclut le milieu physique de propagation et également des organes d'émission et de réception.

Afin d'étudier l'influence d'un support de transmission sur le signal à transmettre, considérons la chaîne de transmission sur la figure suivante :



Fig 2. Modèle élémentaire de transmission

Les cinq éléments qui y figurent sont définis comme suit :

- La source produit le message à transmettre.
- L'émetteur produit un signal adapté au canal de transmission.
- Le canal de transmission constitue le lien entre émetteur et récepteur.
- Le récepteur capte le signal et recrée le message.
- Le destinataire traite le message reçu.

Tout l'enjeu consistera à choisir et concevoir adéquatement l'émetteur et le récepteur. Avant de donner un aperçu plus détaillé de ceux-ci, précisons les notions de source et de canal

3. Caractéristiques des supports de transmission

3.1. Vitesse de propagation :

Une caractéristique importante du canal est la vitesse de propagation du signal (peut dépendre de la fréquence du signal). La vitesse de propagation usuelle des signaux électriques sur câble bifilaire ou coaxial est de **150 000 à 220 000 km/s**.

Dans l'air ou le vide, la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique (célérité) est de **$C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s (299 792 458 m/s)}$** .

Dans un coaxial ou une fibre optique on observe que $v \approx 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Dans une paire torsadée v varie 0,5 à 2 $\cdot 10^8 \text{ m/s}$

La longueur d'onde est définie par $\lambda = v/f$, celle-ci sera souvent inférieure à la longueur du support de transmission et donc, induira éventuellement des phénomènes d'écho...

3.2. Utilisation du Décibel :

3.3.1. Intérêt du décibel

Les techniciens et ingénieurs qui travaillent dans les télécommunications et a fortiori dans les radiocommunications utilisent le décibel (dB) très fréquemment et souvent ses variantes : dB, dBm, dBi, dB μ V, etc..

Le décibel permet en effet de simplifier les calculs en transformant des produits de grandeurs en somme de leurs logarithmes. Il permet aussi de représenter plus simplement des grandeurs qui varient dans une très grande dynamique.

3.3.2. Origine du décibel

Le décibel est une unité initialement introduite en acoustique pour traduire mathématiquement le fait que la sensation auditive est proportionnelle au logarithme de la puissance acoustique (loi de Fechner).

3.3.3. Rapport de puissance en dB

Si P_2 et P_1 sont deux puissances, le rapport en décibel de P_2 sur P_1 s'écrit :

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

\log_{10} : logarithme décimal ne pas confondre avec \ln : logarithme népérien.

Exemple d'application : gain d'un amplificateur.

Le gain en puissance d'un amplificateur est le rapport de la puissance de sortie sur la puissance d'entrée, on l'exprime souvent en dB.

$$G_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{SORTIE}}}{P_{\text{ENTREE}}} \right)$$

Exercice

Q.1) On injecte à l'entrée d'un amplificateur une puissance $P_1 = 10 \text{ mW}$, on obtient en sortie une puissance $P_2 = 200 \text{ mW}$. Calculer le gain en dB de l'amplificateur.

Q.2) Un amplificateur à un gain de 18 dB, calculer P_2 en sortie si $P_1 = 1 \text{ mW}$.

3.3.4. Rapport de courant ou de tension en dB

La puissance électrique d'un signal étant proportionnelle au carré de la tension ou du courant, ($P = R \cdot I^2 = V^2/R$), le rapport de deux puissances peut s'exprimer en fonction du rapport des tensions ou des courants :

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\text{dB}} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{V_2^2}{V_1^2} \cdot \frac{R}{R} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 = 20 \cdot \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Le décibel ou dB (10^e du bel) est une unité logarithmique sans dimension. Elle exprime le rapport entre deux grandeurs de même nature. Si P_1 et P_2 sont deux puissances, le rapport en dB de P_2 sur P_1 s'écrit

(Gain si positif et atténuation si négatif).

Elle fut renommée décibel en 1923 ou 1924 en l'honneur du fondateur du laboratoire et pionnier des télécoms, Alexander Graham Bell.

3.3. Affaiblissement (ou Atténuation) :

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, s'accentue avec la longueur de celui-ci. La quantité d'énergie perdue dépend très étroitement de la fréquence du signal et de la bande passante du système. On mesure l'atténuation par le rapport **Ps/Pe** où Ps est la puissance du signal à la sortie du canal et Pe la puissance du signal à l'entrée du canal. Il est courant d'exprimer l'atténuation en décibels (dB) sous la forme :

$$A(\text{dB}) = 10 \log(P_s/\text{Pe})$$

$$G(\text{dB}) = 10 \log P_s/\text{Pe} \quad (\text{Gain ou atténuation si négatif})$$

De même qu'en acoustique on a défini comme puissance sonore le dBA ($0 \text{dBA} = 10^{-5}$ Pascal), en transmission on utilise le **dBm** pour quantifier la puissance transmise.

$0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$

Exemple : Un modem émet un signal d'une puissance de -10 dBm sur une ligne qui atténue de 25 dB et d'impédance 600Ω .

- La puissance émise sera : $P = 10^{(-10/10)} \text{ mW} = 0,1 \text{ mW}$.
- La puissance reçue sera de -35 dBm ou de $P_r = 10^{(-35/10)} \text{ mW} = 316 \text{ nW}$.
- La tension reçue sera de $U_r = \sqrt{RP} = 13 \text{ mV}$

Atténuation en néper :

L'atténuation d'un support sera parfois calculée en néper : $\alpha = \ln \left| \frac{v_s}{v_e} \right|$

Il existe une relation directe entre néper et dB :

$$\alpha = \ln \sqrt{\frac{P_s}{P_e}} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{P_s}{P_e} \right) = k \left[10 \log \left(\frac{P_s}{P_e} \right) \right] = k \cdot Att$$

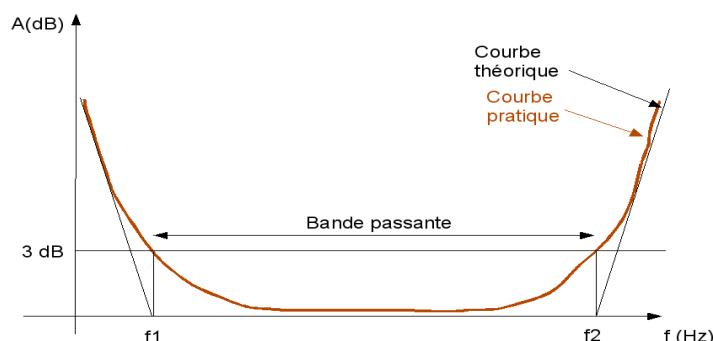
avec $\ln(x) = \log(x) \cdot \ln(10)$ on peut déduire :

$$k = \frac{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{P_s}{P_e} \right)}{10 \cdot \log \left(\frac{P_s}{P_e} \right)} = \frac{\ln(10)}{20} = 0,114$$

$1 \text{ néper} = 8,69 \text{ dB}$

3.4. Bande passante et rapidité de modulation:

Un canal de transmission, quel qu'il soit, est par nature imparfait. Cela signifie qu'il ne véhicule correctement que les fréquences appartenant à une zone caractéristique. Cette zone caractéristique correspond à un intervalle de fréquences et porte le nom de bande passante (BP). Nous vous représentons cette notion sur le schéma suivant :



Pour des signaux parfaits (que nous visualisons sur la courbe théorique), l'atténuation est nulle dans l'intervalle de fréquences. En dehors de cet intervalle, le signal subit une atténuation exponentielle (linéaire en décibels).

Dans la réalité, l'atténuation ne varie pas aussi brusquement. Pour les signaux réels, on définit la bande passante à 3 dB (courbe pratique).

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.

L'affaiblissement du signal sur une ligne est en général considéré négligeable pour les fréquences comprises entredeux 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 $\frac{1}{4}$ appelée rapidité de modulation (R) ou vitesse de signalisation et mesurée en bauds $\frac{1}{4}$ 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 grande). Relation de Nyquist : $R = 2H$ ($H = \text{BP}$).

Exemple : Bande passante du téléphone

La bande passante du téléphone s'étale de 300 Hz à 3,4 kHz

La bande passante est une caractéristique physique du support de transmission et dépend généralement de la construction, de l'épaisseur et de la longueur de ce support. Dans certains cas, un filtre est introduit dans le circuit afin de limiter la largeur de la bande passante mise à la disposition de chaque client.

Par exemple, le câble téléphonique peut avoir une bande passante de 1 MHz sur de courtes distances, mais les opérateurs ajoutent un filtre qui limite la largeur de bande à environ 3100 Hz pour chaque utilisateur. Cette quantité convient à l'entretien d'une conversation audible. En outre, cette réduction des ressources consommées améliore l'efficacité globale du système.

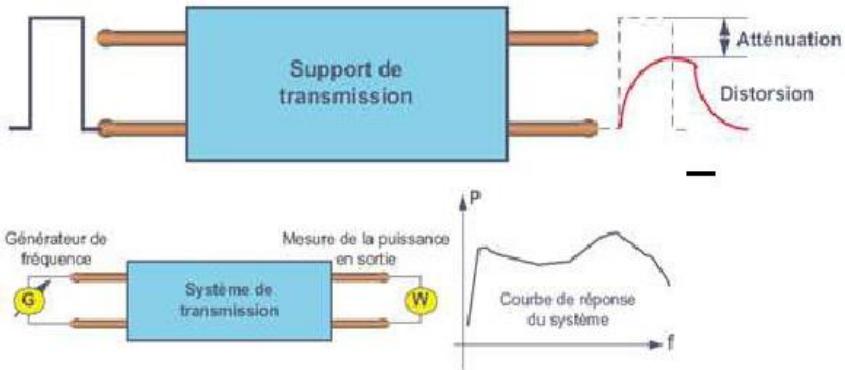


figure 2.2 deformation du signal par le support de transmission

Exemple :

Une ligne téléphonique ordinaire ne laisse passer que les signaux de fréquence comprise entre 300Hz et 3400Hz. Au dehors de cette bande les signaux sont fortement atténuée et ne sont plus compréhensible, on dit alors que la bande passante d'une telle ligne est de 3400–300 Hz soit 3100Hz. Par contre un câble coaxial utilisé dans les réseaux locaux a une bande passante nettement supérieur dont la largeur est de l'ordre des centaines de MHz (300 à 400 MHz).

Il est important de noter que lorsqu'on parle de bande passante W (en Hz), on indique une longueur d'intervalle sans préciser les bornes de cet intervalle.

Remarque:

Nous savons d'après le théorème de Fourier qu'un signal rectangulaire se compose d'un nombre infini de fréquence.

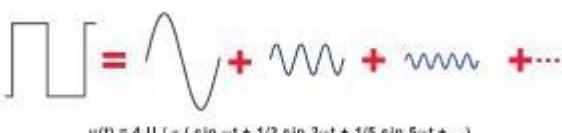


figure 2.3 décomposition d'un signal en somme sinusoïdale

Un support de transmission, caractérisé comme on a vu précédemment par une bande passante limitée, ne peut donc en aucun cas transmettre fidèlement un tel signal et celui-ci ne peut être transmis qu'ampuise de ses fréquences se trouvant en dehors de la bande passante du canal. On montre cependant que pour garantir une transmission correcte du signal, il n'est pas nécessaire que le canal transmette fidèlement toutes les fréquences du signal, mais il suffit qu'il transmette correctement que la largeur de bande de ce signal, définie comme étant l'ensemble de fréquences où est localisé l'ensemble de l'énergie du signal.

3.5. Bruit

Enfin, la sensibilité aux parasites impose des contraintes fortes sur la longueur d'une ligne de transmission et sur l'environnement dans lequel celle-ci peut être employée. Types de parasites : le *bruit blanc*, dû à l'agitation thermique, peu gênant pour la transmission de données (permanent mais de faible amplitude, moyenne nulle et de densité spectrale constante) ; *bruits impulsifs*, dus à des phénomènes de diaphonie, décharges électriques, commutation mécanique, etc., provoquent souvent des erreurs de transmission (forte intensité et durée brève, mais suffisante pour couvrir un long segment de données sur une ligne à haut débit). La sensibilité aux parasites électromagnétiques (bruits impulsifs) est importante

pour un câble bifilaire sansblindage, se réduit sensiblement par l'utilisation d'un blindage ou d'un câble coaxial et est pratiquement nulle pour la fibre optique.

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 bruit).

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

A. bruit blanc

Le bruit blanc 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.

B. 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. Les sources de bruit impulsif sont nombreuses. On peut citer notamment :

- la diaphonie (crosstalk): est d'une manière générale, une influence mutuelle indésirable entre signaux utiles transmis sur des conducteurs voisins l'un de l'autre dans l'espace, par exemple dans un même câble. Cela résulte principalement d'un couplage inductif dû au champ magnétique de l'une des lignes sur l'autre et réciproquement.
- Les brusques variations de courant sur les lignes d'alimentations électriques.
- Phénomènes atmosphériques, solaires, ou autres.

Notion de 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 S/B et on a coutume de l'exprimer sous la forme: **10 log(S/B)(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.

La sensibilité d'un récepteur est l'amplitude du signal qu'il faut appliquer à son entrée pour obtenir à la sortie du démodulateur un rapport signal/bruit déterminé (transmission analogique) ou un taux d'erreur donné en transmission numérique (10-3 ou 10-6). Signification : C'est la puissance minimale en dessous de laquelle la qualité de la liaison est dégradée : craquements importants (« friture ») pour une liaison audio, image dégradée en transmission vidéo (« neige »), taux d'erreur important en transmission numérique (« pixellisation » ou « figeage » de l'image en TV vidéo numérique).

3.6. Notion de débit :

3.6.1. Débit d'un signal numérique

Pour un signal numérique, on appelle débit binaire D la quantité d'informations émises par unité de temps par une source. L'unité de débit binaire est le bit par seconde ou bps.

Le débit binaire dépend des caractéristiques physiques du support de transmission et des techniques de transmission utilisées. Naturellement il ne possède de signification que dans le contexte de l'existence d'un signal. Par définition, le débit représente le nombre d'éléments binaires transmis par seconde, il est donc l'inverse de la durée d'un élément binaire ou intervalle significatif :

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

Exemple 1.3. débits bruts de quelques signaux numériques connus :

- signal de la parole : 64 Kbps
- Visioconférence couleur : 100 Mbps
- Télévision couleur : 204 Mbps

Plus concrètement, on pourra évaluer un débit si l'on connaît la quantité de bits à émettre et la durée de l'émission à partir d'une source. La formule pratique s'écrit :

$$D = \frac{N_{octets} \times 8}{t_{transm}}$$

où N_{octets} représente le nombre d'octets à émettre et t_{transm} , le temps nécessaire pour émettre ces octets.

Exemple : Calcul du temps d'émission

Calculons le temps d'émission d'un message de 512 octets en sortie d'une carte réseau fonctionnant à 100 Mbps.

La formule que nous venons de donner ci-dessus montre que le temps d'émission est tout simplement égal au nombre de bits émis divisé par le débit, soit :

$$D = \frac{512 \times 8}{100 \times 10^6} = 40,96 \mu s$$

Dans le cas d'un signal analogique, on ne peut plus définir le débit d'information directement. Il faut pouvoir associer des tranches de temps du signal continu aux éléments binaires.

3.6.2. Capacité d'un canal

Un canal de transmission parfait n'existe pas dans la pratique et l'on est amené à considérer que le signal réellement transmis est la somme du signal à transmettre et d'un bruit additif. Le bruit d'un dispositif électronique est caractérisé par le rapport signal/bruit tel que :

$$[\frac{S}{N}]_{dB} = 10 \log_{10}(\frac{S}{N})$$

dans laquelle S représente la puissance du signal et N celle du bruit. Pour un support (on dira aussi canal de transmission) donné, on définit la capacité d'un canal comme le débit binaire théorique maximum que ce canal peut supporter. La capacité C est évaluée à l'aide de la formule de Shannon :

! Important

Équation 1.4. Formule de Shannon

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

avec W, la largeur de la bande passante, S la puissance du signal et N la puissance du bruit inhérent à la ligne.

Exemple 1.5. Calcul de Capacité théorique

Calculons la capacité théorique du réseau MAP pour lequel la largeur de la bande passante vaut 12 MHz et le rapport signal/bruit vaut 26 dB

D'après la première formule ci-dessus, on a :

$$26 = 10 \times \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \Rightarrow \frac{S}{N} = 10^{2,6} \approx 398,11$$

Nous trouvons donc notre rapport S/N = 398,11

En appliquant la formule de Shannon, il vient : $C = 12 \cdot 10^6 \log_2(398,11)$, soit $C = 103,5$ Mbps.

En conclusion, nous dirons que le débit binaire sur un canal bruité est limité et que cette limite dépend de la bande passante du canal de transmission et de son rapport signal/bruit.

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 ~ 28 000bit/s.

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

! quelques rappels sur les logarithmes

Remarque épistémiologique : Les deux fonctions logarithmes les plus utilisées sont celles à base $e = 2,71828\dots$ et à base 10. On les appelait respectivement autrefois le grand log (Log) et le petit log (log). aujourd'hui, logarithme népérien (ln) et logarithme à base 10 (log).

Changement de base

$$\log_b x = \left(\frac{\log_a x}{\log_a b} \right)$$

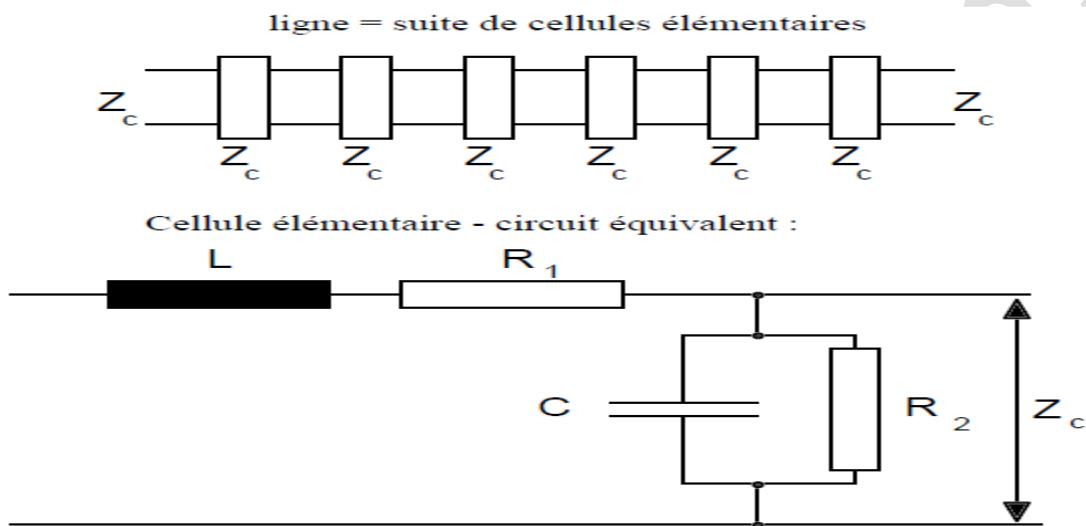
soit par exemple :

$$\log_2 x = \left(\frac{\log_{10} x}{\log_{10} 2} \right) = \frac{\log x}{\log 2} = \frac{\ln x}{\ln 2}$$

3.7. Impédance caractéristique

3.7.1. Modélisation d'une ligne

Pour un canal qui transmet des signaux électriques, une caractéristique importante est l'*impédance caractéristique de la ligne*. En effet, la ligne peut être modélisée comme une suite de cellules élémentaires (une cellule par unité de longueur), à chaque cellule correspondant un circuit équivalent :



La *résistance* R_1 de la ligne est proportionnelle à la longueur et la résistivité du matériel conducteur utilisé, et inversement proportionnelle à sa section. L'*inductance* L est proportionnelle à la longueur et dépend du diamètre des conducteurs, de leur espacement et de leur configuration. La *capacité* C de la ligne est proportionnelle à sa longueur et à la permittivité du milieu isolant et inversement proportionnelle à l'espacement entre les conducteurs. La *perditance* R_2 est due à l'imperfection du milieu isolant et est inversement proportionnelle à la longueur de la ligne ; la perditance est en partie dépendante de la fréquence du signal véhiculé.

Une ligne doit être refermée sur son impédance caractéristique et ne pas subir de variation locale d'impédance. Dans le cas contraire, des ondes réfléchies apparaissent, produisant une instabilité des signaux et une pollution électromagnétique de l'environnement.

Ce modèle de ligne permet de comprendre pourquoi tout signal transmis subit deux types de modifications qui dépendent de la longueur de la ligne et de la fréquence du signal :

1° un affaiblissement ;

2° un déphasage.

L'*affaiblissement linéique* (défini donc pour une certaine fréquence) est mesuré en décibels/unité de longueur (dB/km) :

$$A_l = 10 \log_{10} \frac{\text{énergie du signal initial}}{\text{énergie du signal après une unité de longueur (km)}}$$

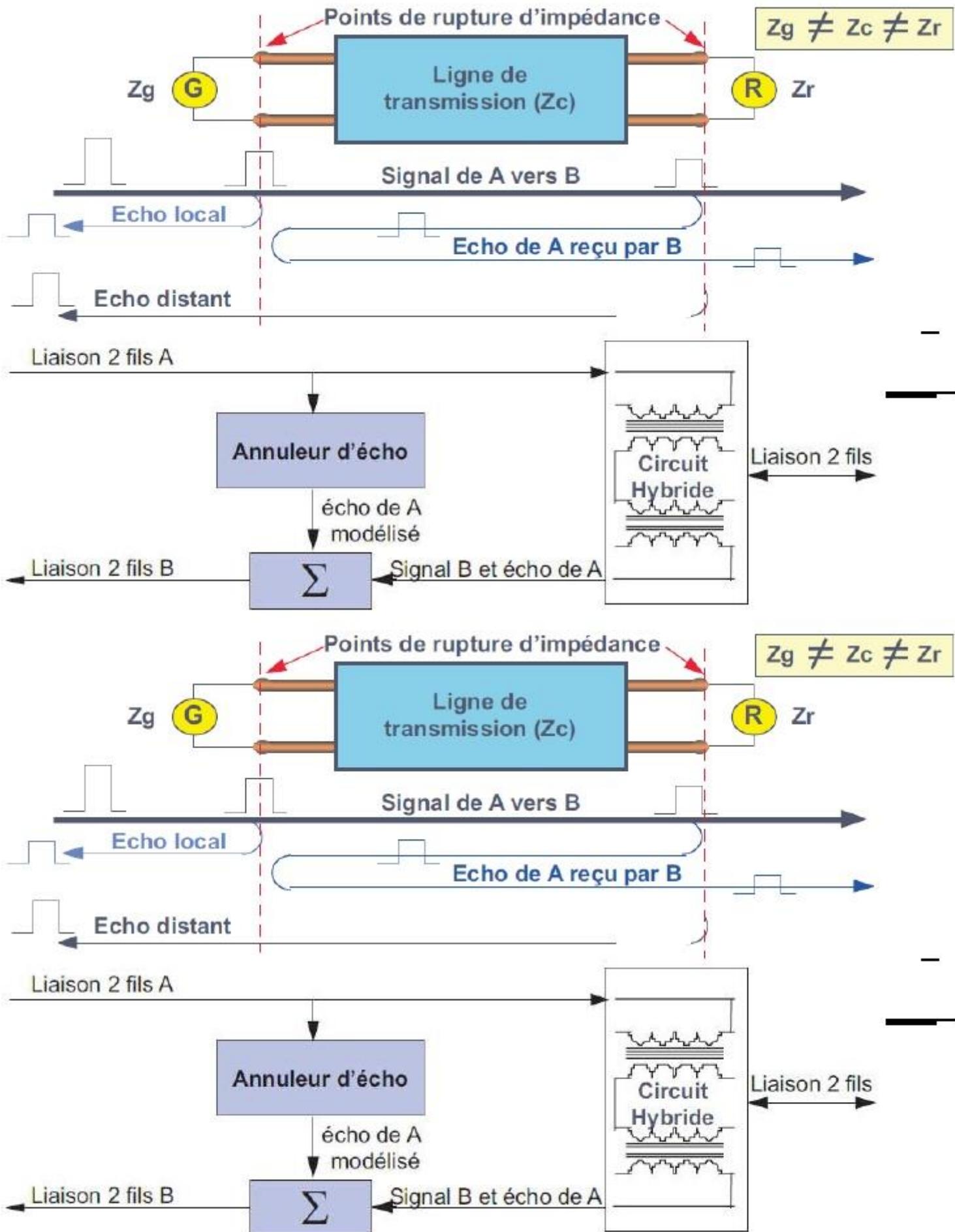
Pour faire face à ce problème, dans le cas d'une transmission analogique le signal est amplifié et dans le cas d'une transmission numérique le signal est régénéré.

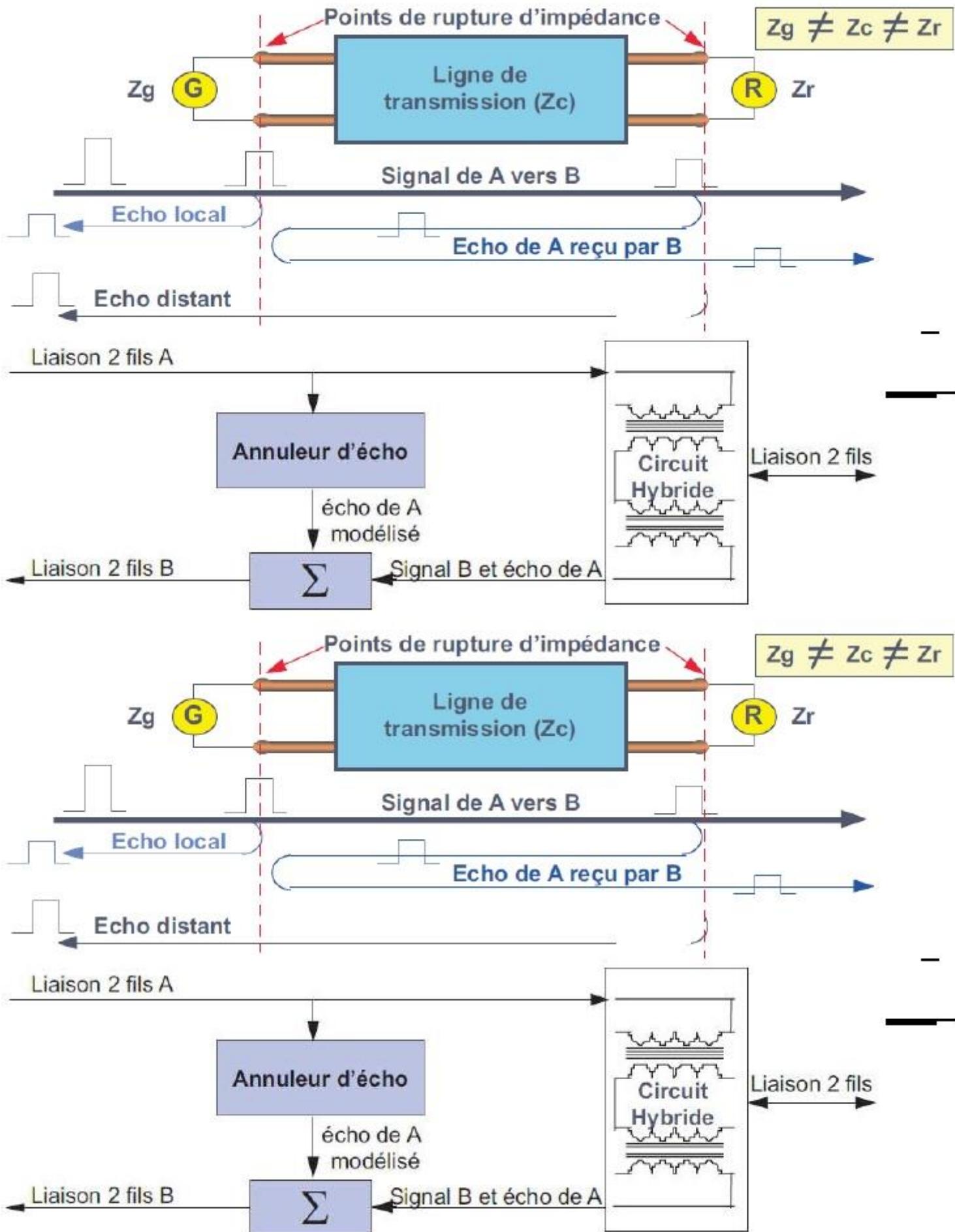
10 Fig.7: Notion d'écho. Pour éviter ces réflexions parasites, il est nécessaire, tout au long de la ligne et à chaque raccordement d'un nouvel élément à la liaison, de réaliser la continuité de l'impédance : c'est l'adaptation d'impédance. Cependant, celle-ci n'est pas toujours réalisable. Par exemple, la ligne qui raccorde un usager à un réseau peut être en 2

fils, alors que la transmission dans le réseau de l'opérateur s'effectue en 4 fils (2 fils par sens de transmission), le passage de 2 à 4 fils provoque une rupture d'impédance et des échos. L'emploi d'annuleur d'écho est alors indispensable (figure 8). Fig.8: Principe de l'annulation d'écho. Le filtre annuleur d'écho de la figure 8 réalise une estimation du signal d'écho en amplitude et phase (modélisation mathématique). Ce signal est ajouté en opposition de phase au signal de l'autre canal. Le système est symétrique pour les deux canaux de communication (injection d'une partie du signal B dans A).

5 L'onde stationnaire :

Pour un câble d'impédance (Z_c) fermé sur une impédance (Z_r) on définit : Le taux d'ondes stationnaires (





6 Abaque de Smith

L'abaque de Smith constitue un outil largement utilisé dans le domaine des hyperfréquences. C'est un outil de calcul graphique permettant la représentation des grandeurs complexes vues sur une ligne de transmission. Afin d'avoir un abaque indépendant de la valeur de l'impédance caractéristique de la ligne, l'abaque doit être normalisé par rapport à celle-ci. En général l'abaque est normalisé par rapport à 50

Ω

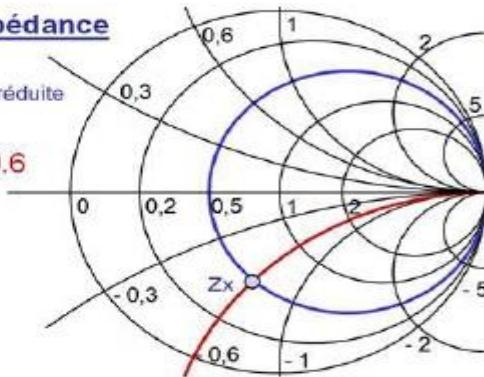
qui constitue le standard d'impédance en hyperfréquences. La relation liant le coefficient de réflexion à l'impédance caractéristique et l'impédance de charge d'une ligne est donnée par:

Utilisation de l'abaque de Smith.

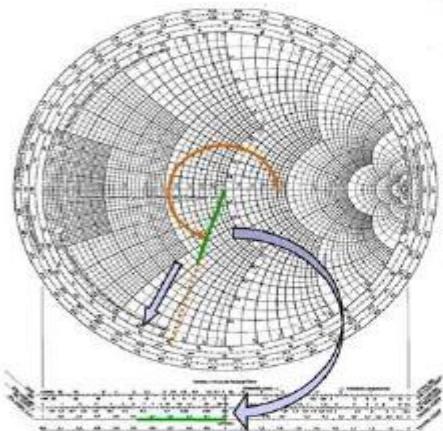
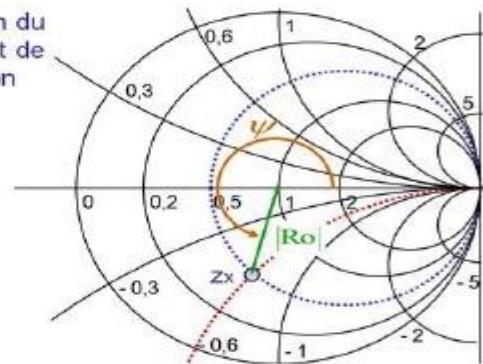
Si on connaît l'impédance

↳ Calcul de l'impédance réduite

Exemple : $z_x = 0.5 - j0.6$



Déduction du coefficient de réflexion



On trouve alors :

$$R_x = 0.48 e^{j108^\circ}$$

On peut vérifier :

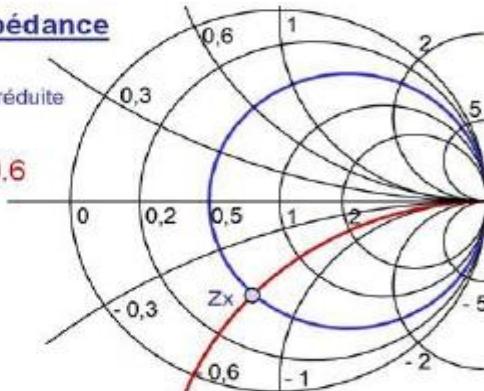
$$R_x = \frac{z_x - 1}{z_x + 1}$$

$$R_x = -0.15 - j0.46$$

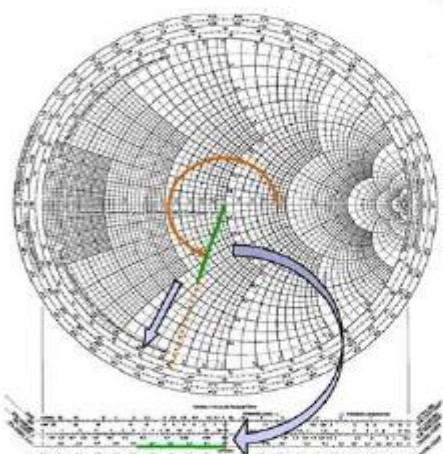
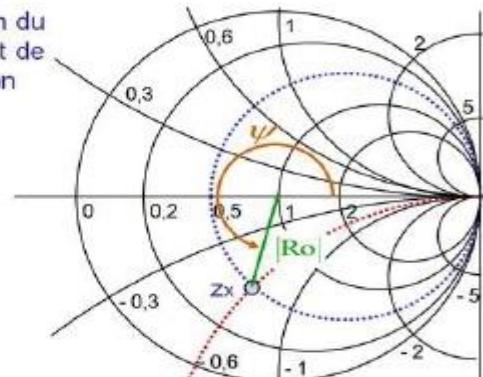
Si on connaît l'impédance

↳ Calcul de l'impédance réduite

Exemple : $z_x = 0.5 - j0.6$



Déduction du coefficient de réflexion



On trouve alors :

$$R_x = 0.48 e^{j108^\circ}$$

On peut vérifier :

$$R_x = \frac{z_x - 1}{z_x + 1}$$

$$R_x = -0.15 - j0.46$$

Chapitre 2

Conducteurs électriques

Les supports filaires de transmission

"paire de cuivre..."

4. Introduction

Les différents types de supports physiques se distinguent par des caractéristiques comme :

- la bande passante
- le délai de transmission
- le coût
- la simplicité d'installation ou d'exploitation, de maintenance
- etc.

On distingue trois grandes familles de supports de transmission:

- Les liaisons filaires (ou conducteurs électriques).
- Les liaisons optiques.
- Les liaisons hertziennes.

Paire bifilaire

La ligne bifilaire est constituée de 2 fils conducteurs cylindriques identiques parallèles entre eux. - peu coûteux, - pertes élevées, débit limité.

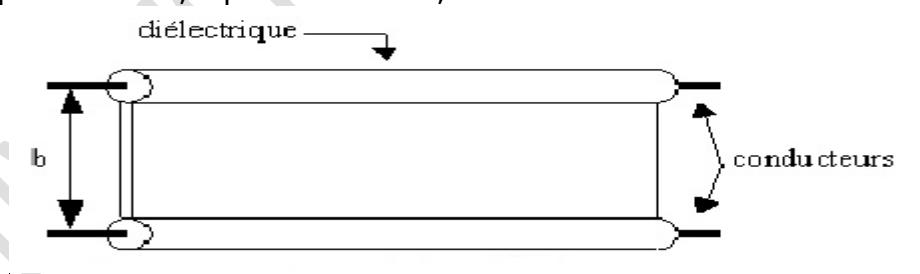


Figure 1 : Paire bifilaire

Nous allons voir dans cet article différents types de supports filaires de transmission. Les supports de transmission servent à véhiculer des données entre un émetteur et un récepteur. International Standard Organisation (ISO) Nous allons donc parler ici de deux d'entre eux : le câble à paire de cuivre torsadée et le câble coaxial.

2. La paire torsadée

Il s'agit d'un des supports de transmission les plus anciens et qui est toujours d'actualité.

2.1. Description

La transmission d'un signal est sujette à des interférences, qu'on réduit en premier lieu par une [liaison symétrique](#) avec [signalisation différentielle](#), dans laquelle la différence de tension entre les deux conducteurs transporte l'information, tandis que le récepteur rejette les variations de tension entre ces conducteurs et la masse. Comme les perturbations dont l'origine est à quelque distance affectent également les deux conducteurs de la ligne, le récepteur les élimine dans leur plus grande partie.

Cependant, lorsque deux paires symétriques courent parallèlement, des liaisons inductives et capacitives se forment entre elles. Le signal de l'une se retrouve dans le signal de l'autre. C'est ce qu'on appelle la [diaphonie](#). La torsion des paires, à un pas différent pour chaque ligne, permet de réduire cet effet. Lorsque la ligne est courte, la diaphonie est de toute façon faible. Lorsque la ligne est longue, les paires se trouvent tantôt en phase, tantôt en opposition de phase, annulant leurs effets.

Le maintien de la distance entre fils de paire permet de maintenir l'[impédance caractéristique](#) de la [ligne de transmission](#), afin de supprimer les réflexions de signaux aux raccords et en bout de ligne. 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](#).

Le nombre moyen de torsades par mètre fait partie de la spécification du câble. Chaque paire d'un câble est torsadée de manière légèrement différente pour éviter la diaphonie.

Une **paire torsadée** est une [ligne symétrique](#) formée de deux fils conducteurs enroulés en hélice l'un autour de l'autre. Cette configuration a pour but principal de limiter la sensibilité aux [interférences](#) et la [diaphonie](#) dans les câbles multipaires.

En français, « paire symétrique » est, en [téléphonie](#), synonyme de « paire torsadée »¹.

Les paires torsadées se trouvent en téléphonie, en [électroacoustique](#), en [instrumentation](#) et en transmission de données informatiques, domaine où elles ont fait l'objet d'importants développements. Elles s'utilisent aussi dans les câbles de puissance, afin de réduire leurs émissions.

La paire torsadée se compose de deux fils de cuivres isolés d'une épaisseur d'environ 1mm. Ces fils sont enroulés l'un sur l'autre de façon hélicoïdale, telle une molécule d'ADN. Cela permet de réduire les radiations électromagnétiques perturbatrices, car les ondes rayonnées de chaque torsade s'annulent (alors que deux fils parallèles constituent une antenne rayonnante).

La paire torsadée ou symétrique est constituée de deux conducteurs identiques torsadés. Les torsades réduisent l'inductance de la ligne (L). Généralement plusieurs paires sont regroupées sous une enveloppe protectrice appelée gaine pour former un câble. Les câbles contiennent 1 paire, 4 paires (réseaux locaux), ou plusieurs dizaines de paires (câble téléphonique).



2.2. Caractéristiques :

Les paires torsadées peuvent servir à transmettre des signaux analogiques ou numériques. La bande passante dépend de l'épaisseur du câble et de la distance à parcourir, mais il est possible dans la plupart des cas d'atteindre plusieurs Mbit/s sur quelques kilomètres. En raison de ses performances satisfaisantes et de son faible coût, la paire torsadée est largement utilisée et elle le sera vraisemblablement encore longtemps.

Impédance caractéristique, bande passante et atténuation sont les caractéristiques essentielles des paires torsadées. Cependant, compte tenu de la proximité des différentes paires dans un câble, un phénomène spécifique apparaît : la diaphonie (figure 3).

La diaphonie

La diaphonie est due au couplage inductif entre paires voisines, correspond au transfert du signal d'un câble à un autre. Elle limite l'utilisation de la paire symétrique à de faibles distances.

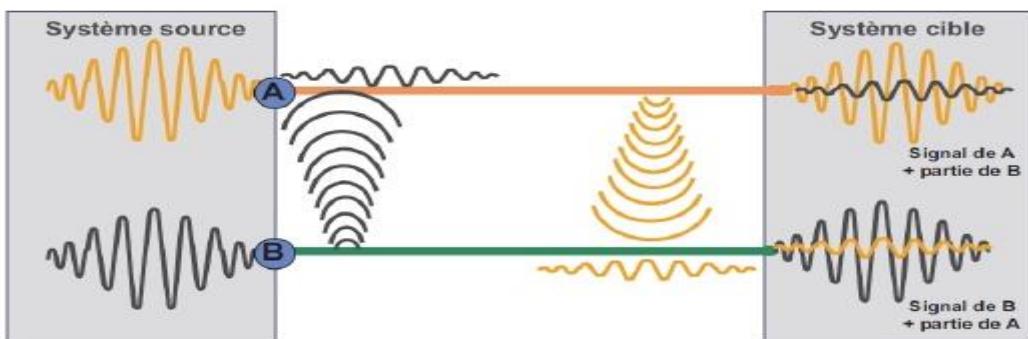


Figure 3 : Couplage inductif entre paires : la diaphonie.

Deux grandeurs ont été introduites pour mesurer ce phénomène : la paradiaphonie et la télédiaphonie. La paradiaphonie (Next ou Near end crosstalk) et la télédiaphonie (Fext ou Far end crosstalk) indiquent l'affaiblissement du signal transmis sur les paires avoisinantes par rapport au signal d'entrée, l'une est mesurée près de la source (Near), l'autre à l'extrémité (Far).

2.3. Histoire

Le principe de la paire torsadée apparaît dans les transmissions télégraphiques et téléphoniques dès que celles-ci se font par paires, et non par retour du courant par la terre. En faisant tourner la paire d'un quart de tour, d'un poteau à l'autre, on réduit les interférences : ce qui influe sur la ligne entre deux poteaux est affaibli deux poteaux plus loin par une interférence en opposition de phase. En utilisant, plutôt que des fils nus espacés de 30 cm, des câbles contenant les deux conducteurs plus proches l'un de l'autre, légèrement torsadés, l'influence du [champ électromagnétique](#) alentour diminue substantiellement. La technique devient plus nécessaire alors que le [multiplexage](#) augmente la [bande passante](#) nécessaire, et diminue le niveau du signal. Les câbles contenant des paires torsadées ont été utilisés dans les câbles du [réseau téléphonique commuté](#) vers 1920². La gaine extérieure des câbles était en plomb, et l'isolant des fils en papier recouvrant une couche d'[émail](#) ou de [gomme-laque](#)^[réf. souhaitée]. La torsion est favorable non

seulement à la performance électrique, mais aussi à la résistance mécanique. Si les conducteurs n'étaient pas torsadés, la torsion dans le plan de la paire serait bien plus préjudiciable que dans le sens perpendiculaire, le conducteur extérieur étant soumis à une forte tension mécanique, et le diélectrique entre les deux à une compression. Les améliorations suivantes concernent l'isolation au [polyéthylène](#), qui améliore la symétrie de la paire².

Le développement des télécommunications a entraîné des études électriques plus poussées, et le développement de la théorie de la [ligne de transmission](#). L'industrie fabrique pour le téléphone des câbles comportant jusqu'à 25 paires torsadées à des pas différents pour réduire la diaphonie. Les studios d'enregistrement et les stations de radio et de télévision, dont les exigences sont supérieures, étudient l'usage de ces câbles, mais ils restent en tous cas utilisés seulement pour des fréquences allant au plus à quelques dizaines de kilohertz³.

À la fin des années 1980, la numérisation du signal audio entraîne en premier lieu une amélioration des performances, entraînant un nouvel examen du câble⁴. La transmission du signal numérique demande une élévation des fréquences, atteignant quelques mégahertz. Les câbles à paire torsadée blindé généralement utilisés dans les applications électroacoustiques doivent être plus précisément définis. Il doit répondre à des normes strictes de [compatibilité électromagnétique](#). L'industrie électroacoustique et la radio-télédiffusion définissent la paire torsadée [AES/EBU](#) pour la transmission numérique des deux canaux du signal [stéréophonique](#).

La transmission numérique à haut débit dans les [réseaux informatiques](#) a commencé avec du [câble coaxial](#) disponible commercialement pour l'usage en radio et télévision. Les études aboutissant à des optimisations de la paire torsadée ont ensuite permis son utilisation. Au début du XXI^e siècle, les réseaux utilisent fréquemment du [câble catégorie 5](#) et supérieures, basés sur un assemblage de quatre paires torsadées à des pas calculés pour minimiser les interférences. Ces câbles sont plus souples et plus solides que les câbles coaxiaux, et leurs connecteurs sont moins coûteux.

2.4. Les types de blindages

Pour limiter les interférences, les paires torsadées sont souvent blindées. 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'écrantage.

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 entourée d'aucun blindage protecteur.
- Paire torsadée écrantée : *Foiled twisted pair (FTP)* - dénomination officielle F/UTP. L'ensemble des paires torsadées a un blindage global assuré par une feuille d'aluminium. L'écran est disposé entre la gaine extérieure et les 4 paires torsadées. Les paires torsadées ne sont pas individuellement blindées.
- Paire torsadée blindée : *Shielded twisted pair (STP)* - dénomination officielle U/FTP. Chaque paire torsadée blindée est entourée d'un écran en aluminium, de façon similaire à un [câble coaxial](#).
- Paire torsadée doublement écrantée : *Foiled foiled twisted pair (FFTP)* - dénomination officielle F/FTP. Chaque paire torsadée est entourée d'une couche conductrice de blindage en aluminium. L'ensemble des paires torsadées a un écran collectif en aluminium.
- Paire torsadée écrantée et blindée : *Shielded foiled twisted pair (SFTP)* - dénomination officielle SF/UTP. Câble doté d'un double écran (feuille métallisée et tresse) commun à l'ensemble des paires. Les paires torsadées ne sont pas individuellement blindées (contrairement à ce que le terme *Shielded foiled twisted pair* pourrait faire croire).

- Paire torsadée doublement blindée : *Shielded shielded twisted pair (SSTP)* - dénomination officielle S/FTP. Chacune des paires est blindée par un écran en aluminium, et en plus la gaine extérieure est blindée par une tresse en cuivre étamé. Le terme SSTP ne signifie pas *Shielded shielded twisted pair* puisque les paires ne sont pas individuellement blindées par une tresse.

Tableau récapitulatif avec les dénominations officielles (norme ISO/IEC 11801)

Dénomination courante	Dénomination officielle	Blindage de l'ensemble du câble	Blindage des paires individuelles
UTP	U/UTP	aucun	aucun
STP	U/FTP	aucun	feuillard
FTP	F/UTP	feuillard	aucun
FFTP	F/FTP	feuillard	feuillard
SFTP	SF/UTP	feuillard, tresse	aucun
SSTP	S/FTP	Tresse	feuillard

Le code avant le slash (la barre oblique) désigne le blindage pour le câble lui-même (l'ensemble des paires torsadées), alors que le code après le slash détermine le blindage des paires individuelles.

L'abréviation se décompose donc selon le schéma suivant :

type de blindage pour l'ensemble du câble / type de blindage pour les paires torsadées

TP = *twisted pair* paire torsadée

U = *unshielded* non blindé

F = *foil shielding* blindage par feuillard

S = *braided shielding* blindage par tresse

2.5. Les catégories de câbles

L'UTP est standardisé en diverses catégories d'intégrité du signal. Ces différentes catégories sont ratifiées par les autorités de normalisation américaines ANSI/TIA/EIA, Européennes CENELEC 50173, internationales ISO 11801, ou autres.. La norme française définissant le câblage structuré reprend la version européenne, et à la suite de la traduction s'appelle: NF/EN 50173-1.

Catégories 1 et 2

Les catégories 1 et 2 n'ont jamais existé. La première normalisation EIA/TIA 568 de 1990 a repris le concept de « qualités de câbles » 1 et 2 utilisées par un distributeur, et a commencé la numération officielle à 3.

Catégorie 3

La catégorie 3 est un type de [câblage](#) testé à 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 (systèmes téléphoniques, par exemple : Norstar, etc.). Il est également utilisé pour les réseaux Ethernet (10 Mb/s). Ce type de câblage est en abandon depuis 2007 par les opérateurs au bénéfice de câbles de catégorie 5 ou supérieure, pour la transmission de la [voix](#) comme des [données](#). Le code couleur est jaune, vert, rouge, noir. Dans les systèmes de [xDSL](#) on prend le vert et le rouge pour transmettre les données. [\[réf. souhaitée\]](#)

Catégorie 4

La catégorie 4 est un type de câblage testé à 20 MHz. Ce standard fut principalement utilisé pour les réseaux Token Ring à 16 Mbit/s ou les réseaux [10BASE-T⁵](#). Il fut rapidement remplacé par les catégories 5 et 5e. Dans la norme ANSI/TIA/EIA-568B (2011), seule la catégorie 3 est décrite.

[Catégorie 5](#) / Classe D

L'ancienne catégorie 5 permet une bande passante de 100 MHz et un débit allant jusqu'à 100 Mbit/s. Ce standard permet l'utilisation du [100BASE-TX](#), ainsi que diverses applications de téléphonie ou de réseaux ([Token ring](#), [ATM](#)). La catégorie 5 est obsolète et remplacée par la catégorie 5e. À noter que dans la norme ISO 11801, depuis la version 2000, a renommé la nouvelle catégorie 5e en catégorie 5, alors que la normalisation nord-américaine conserve le terme « 5e ».

Catégorie 5e / classe De

La catégorie 5e (*enhanced*) peut permettre une quantité d'information allant jusqu'à 1 000 Mbit/s. C'est un type de câblage testé à 100 MHz (apparu dans la norme TIA/EIA-568B)⁶. La norme est une adaptation de la catégorie 5, améliorée pour permettre le [Gigabit Ethernet](#). Le type de blindage et l'appairage en longueur ne sont pas spécifiés⁷. Dans la norme ISO 11801, depuis 2000, cette catégorie est renommée catégorie 5 / Classe D.

[Catégorie 6](#) / classe E

La catégorie 6 est un type de câblage testé jusqu'à 250 MHz. En théorie il devait permettre le 1000Base-TX, fonctionnant à 200 MHz en 2 x 2 paires simplex au lieu de 77 MHz en 4 paires [full duplex](#). Ceci devait réduire les coûts de production des interfaces réseaux. Aucun fabricant n'a suivi et le 1000base-TX n'existe pas. Par contre, grâce à une moins forte résistance, le câble catégorie 6 reste avantageux par rapport au catégorie 5e pour l'utilisation de [PoE](#) où il permet des économies d'énergie.

[Catégorie 6a](#) / classe Ea

Ratifiée le 8 février 2008, la norme 6a est une extension de la catégorie 6 avec une bande passante de 500 MHz (norme ANSI/TIA/EIA-568-B.2-10). Cette norme permet le fonctionnement du [10GBASE-T](#). Dans la norme internationale, « 6a » s'écrit « 6_A »)

[Catégorie 7](#) / classe F

La catégorie 7 est testée à 600 MHz⁸. Elle permet l'acheminement d'un signal de télévision modulé en bande VHF ou UHF, mais pas dans une bande satellite (qui nécessite une bande passante de 2 200 MHz). La catégorie 7 ne reconnaît pas le connecteur RJ45 et à la place en reconnaît 3 autres. À cause de ce manque de compatibilité, la catégorie 7 est très peu utilisée.

Catégorie 7a / classe Fa

La catégorie 7a est testée à 1 GHz et permet un débit allant jusqu'à 10 Gbit/s, tout comme les catégories 6a et 7. Par contre, le connecteur RJ45 n'est pas reconnu, créant les mêmes difficultés que la catégorie 7 pour connecter les équipements.

Les spécifications des paires torsadées.

Catégorie	Classe	Impédance	Fréquence max.	Application
3	C	100-120 Ω	16 MHz	Token Ring 4 Mbit/s, 10 Base T, Fast Ethernet, 100 VG Any, LAN 100 Base T4
4	D	100 Ω	20 MHz	Token Ring 16 Mbit/s
5	D	100 Ω	100 MHz	Câble UTP et FTP, 100 Base Tx, ATM 155 Mbit/s, 1000 Base T (Cat 5E)
6	E	100 Ω	250 MHz	Câble FTP et SFTP, 1000 Base Tx
6a	E	100 Ω	500 MHz	Câble FTP et SFTP, 1000 Base Tx, 10 G Base T
7	F	100 Ω	600 MHz	Câble SFTP

Quarte ou quad

Les applications, en télécommunications, en électroacoustique, en instrumentation, pour lesquelles une immunité aux interférences supérieure est nécessaire, utilisent deux paires torsadées arrangeées de telle sorte que les perturbations subsistant sur une des paires s'opposent à celles de l'autre. Dans la disposition starquad ([en](#)), quatre conducteurs tournant en étoile autour d'un axe central forment une double paire. L'autre disposition consiste en une torsade de deux paires torsadées⁹.

Conçu à l'origine pour les signaux analogiques en environnement très perturbé, ou avec des contraintes particulières de niveau de bruit de fond, le câble quad sert aussi en transmission numérique¹⁰.

Débit de données et capacité des câbles à paires torsadées non blindées (UTP)

Alors que les normes de câblage précisent la largeur de bande du câblage installé, le débit réel auquel les données peuvent être transmises par un système de câblage dépend de la conception de l'équipement électronique qui lui est raccordé. La largeur de bande du système de câblage est spécifiée en mégahertz (MHz). Le débit de données est, quant à lui, exprimé en bits par seconde ou, plus fréquemment de nos

jours, en millions de bits par seconde (mégabits par seconde – Mbit/s) ou en milliards de bits par seconde (gigabits par seconde – Gbps).

Tandis que la catégorie du système de câblage détermine la largeur de bande maximale offerte, le débit maximal de données que le câblage permet effectivement d'atteindre dépend de l'équipement électronique qui lui est raccordé. Les débits de données normalisés ont tendance à décupler, lorsqu'ils augmentent. Par exemple, le débit de 100 mégabits par seconde (100 Mbit/s) correspond, pour un réseau Ethernet, au niveau normalisé immédiatement supérieur aux 10 mégabits par seconde du réseau original. Par conséquent, il est possible que les normes pouvant tirer parti de la capacité maximale théorique qu'offrent certaines catégories de câbles ne soient pas encore mises au point. Le tableau « Débits de données maximaux » ci-dessous indique les débits de données maximaux (par catégorie de câblage) pour lesquels des normes ont été élaborées.

En quoi cela importe-t-il? En premier lieu, il faut remarquer que le débit de données maximal est identique pour la catégorie 5e et pour la catégorie 6. Les câbles de ces deux catégories peuvent traiter 1 gigabit par seconde ou 1 000 mégabits par seconde (1 Gb/s ou 1 000 Mbit/s). Ainsi, bien que le câblage de la catégorie 6 atteigne une capacité maximale théorique 2,5 fois plus élevée que le câblage de la catégorie 5e, aucune norme existante ne s'applique aux systèmes électroniques qui en tirent parti et aucune norme de ce type n'est en cours d'élaboration. Comme nous l'avons vu plus haut, les débits de données standard tendent à décupler de sorte que le palier immédiatement supérieur à 1 Gb/s est de 10 Gb/s. La nouvelle catégorie 6 améliorée (catégorie 6a) normalisée est nécessaire pour permettre ce débit de données.

Les utilisateurs doivent donc se demander pourquoi ils devraient payer davantage pour un système de câblage de la catégorie 6 (qui ne procure aucune augmentation de rendement par rapport à la catégorie 5e) plutôt que d'installer du câblage moins coûteux de la catégorie 5e.

Alors que les normes ne reconnaissent plus le câblage de la catégorie 5, il existe encore de nombreux systèmes de câblage de cette catégorie. Comme l'indique le document « [Catégories de câbles](#) », les câbles de la catégorie 5 et de la catégorie 5e peuvent traiter une largeur de bande de 100 MHz. La norme de la catégorie 5e comporte toutefois des mesures de certains paramètres non requis par la norme de la catégorie 5. Il est probable qu'un système de haute qualité de la catégorie 5 satisfasse aux exigences des paramètres supplémentaires requis pour la catégorie 5e. Dans un tel cas il ne se limitera pas à un débit de données maximal de 100 mégabits par seconde (considéré normalement comme la limite pour la catégorie 5), il pourra en fait traiter les mêmes débits de données que la catégorie 5e (c'est à dire 1 Gb/s). C'est ce qu'on peut déterminer en vérifiant le système installé de la catégorie 5 par rapport aux exigences de la catégorie 5e. Il suffit habituellement de vérifier un échantillon des câbles installés plutôt que tout le système.

Ce tableau peut aussi aider à déterminer si un occupant subséquent peut réutiliser un système de câblage qui est déjà en place. Par exemple, alors que la catégorie 5e et la catégorie 6 traitent un débit de 1 Gb/s (1 000 Mbit/s), on ne connaît aucun ministère qui utilise plus de 100 Mbit/s vers les aires de travail. Par conséquent, un système de la catégorie 5 devrait répondre aux besoins réels de presque tous les ministères, et il n'est donc pas nécessaire de le remplacer.

Quelques ministères utilisent d'anciens terminaux 3270, également appelés terminaux non intelligents. La plupart fonctionnent à des débits de données de seulement 19 kbit/s (0,19 Mbit/s) environ, bien que certains éléments puissent atteindre 2,5 Mbit/s. Par conséquent, même un système de la catégorie 3 suffirait.

Débits de données maximaux

Catégorie 6a (catégorie 6 améliorée)

10 milliards de bits/seconde (10 gigabits/seconde)

Catégorie 6

1 milliard de bits/seconde (1 gigabit par seconde)

Note : Bien que le débit de données maximal théorique soit d'environ 2,4 milliards bits/seconde (2,4 gigabits par seconde), aucune norme n'est établie pour l'équipement fonctionnant à ce débit de données. Le débit de données normalisé immédiatement supérieur est de 10 gigabits/seconde, et l'équipement utilisant ce débit nécessite des câbles de catégorie 6 améliorée (catégorie 6a).

Catégorie 5e (catégorie 5 améliorée)

1 milliard de bits/seconde (1 gigabit par seconde)

Catégorie 5

100 millions de bits/seconde (100 mégabits par seconde)

Note : La catégorie 5 n'est plus la norme. Bon nombre de systèmes de la catégorie 5 traitent 1 milliard de bits/seconde (1 gigabit/seconde). Un essai permet de vérifier cette valeur.

Catégorie 3

10 millions de bits/seconde (10 mégabits par seconde)

2.6. Le câble à paire torsadée

Le câble à paire torsadée a été largement diffusé parce qu'il est à l'origine utilisé pour les lignes téléphoniques et qu'il était jusqu'en 1983 systématiquement préinstallé dans tous les nouveaux bâtiments américains. Le câble à paire torsadée est le support le plus utilisé à l'intérieur d'un bâtiment à l'échelle mondiale. Ce qui va nous intéresser principalement est un câble téléphonique constitué à l'origine de deux fils de cuivre isolés et enroulés l'un sur l'autre d'où son nom. Les fils sont "enroulés" ou "torsadés" dans le but de maintenir précisément la distance entre fils et de diminuer les pertes de signal (diaphonie). Plus le nombre de torsades est important, plus la diaphonie est réduite.

Le maintien de la distance entre fils de paire permet de définir une impédance caractéristique de la paire, pour supprimer les réflexions des signaux aux raccords et en bout de ligne. Les contraintes géométriques (épaisseur de l'isolant/diamètre du fil) maintiennent cette impédance autour de 100 ohms pour les réseaux Ethernet en étoile, 100/120 ohms pour les réseaux de téléphonie, 90 ohms pour les câbles USB.

Actuellement, on utilise plutôt des câbles constitués de 2 ou 4 paires torsadées. Elle est très répandue, de connexion facile et d'un faible coût. Pour améliorer les performances on utilise la paire torsadée blindée plus résistante aux perturbations électromagnétiques et qui autorise un débit pouvant aller jusqu'à 16 Mbits/s. Il existe quatre types de paires torsadées selon la nature du blindage : la non blindée, la blindée, celle avec blindage général et celle avec double blindage. Et ces paires torsadées sont enfin divisées en cinq catégories selon l'intégrité du signal (notées 1 à 5).

Câble à paire torsadée type 5E blindé

Son intérêt principal est que cette même paire torsadée peut servir au réseau téléphonique, au réseau informatique et vidéo ; elle pourra être utilisée ultérieurement pour évoluer vers des réseaux 100 Base T et même GigaBit. On rencontre la paire torsadée très souvent comme support des réseaux 10/100 Base T mais aussi selon d'autres normes IEEE (Institute for Electrical and Electronics Engineers). Voici les différentes normes de l'Ethernet en matière de câble à paire torsadée :

- 10 Base T : sur 100 mètres maximum, vitesse de 10 Mbps, chaque extrémité d'un tel câble étant munie d'une prise RJ45.
- 100 Base TX : sur 100 mètres maximum, vitesse de 100 Mbps, chaque extrémité d'un tel câble étant muni d'une prise RJ45.
- 1000 Base T : sur 100 mètres maximum, vitesse de 1000 Mbps, chaque extrémité d'un tel câble étant munie d'une prise RJ45.

Prise RJ45

La norme EIA/TIA

La norme EIA/TIA (Electronic Industries Association/Telecommunication Industries Association) a été mise au point aux États-Unis pour garantir la qualité et les conditions d'utilisation des câbles de l'industrie américaine des câbles UTP/STP (Unshielded Twisted Pair/Shielded Twisted Pair). En voici les différentes catégories :

Catégorie	Fonction	Vitesse	Nombre de paires torsadées	Nombre de torsions par "pieds"
1	La voix analogique			
2	Les données numériques	4 Mb/s	4	
3	Les données numériques	10 Mb/s	4	3
4	Les données numériques	16 Mb/s	4	
5	Les données numériques	100 Mb/s	4	

3. Câble coaxial

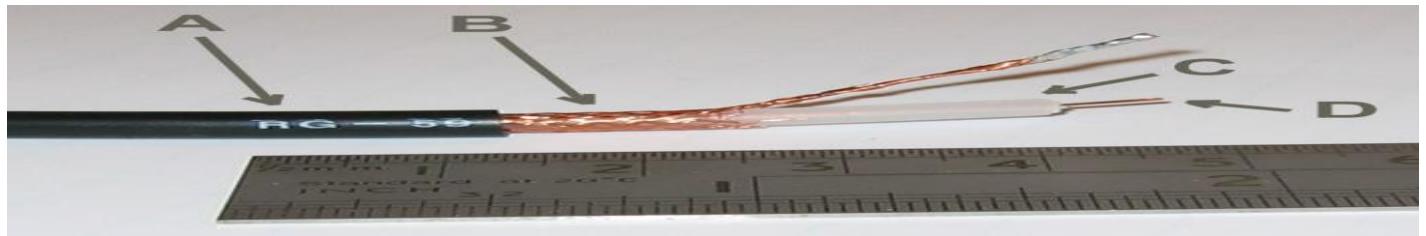
Un autre support encore assez courant est le *câble coaxial* (souvent abrégé en *coax*).

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 (Ω). Il est fréquemment utilisé dans des installations qui, dès le départ, se destinent à la transmission numérique
- L'autre de 75 Ω est généralement utilisé pour la communication analogique et la télévision par câble.

Un câble coaxial se compose d'une *âme* qui est un conducteur rigide (D) en cuivre enfermé dans un matériau isolant (C), lui même entouré d'une tresse conductrice (B). Une gaine en plastique protectrice (A) recouvre le tout.



Un câble coaxial

Une paire coaxiale ou câble coaxial (figure 4) est constituée de deux conducteurs concentriques maintenus à distance constante par un diélectrique. Le conducteur extérieur, tresse métallique en cuivre recuit appelée blindage, est mis à la terre. L'ensemble est protégé par une gaine isolante. Le câble coaxial possède des caractéristiques électriques supérieures à celles de la paire torsadée. Il autorise des débits plus élevés et est peu sensible aux perturbations électromagnétiques extérieures. Le taux d'erreur sur un tel câble est d'environ 10^{-9}

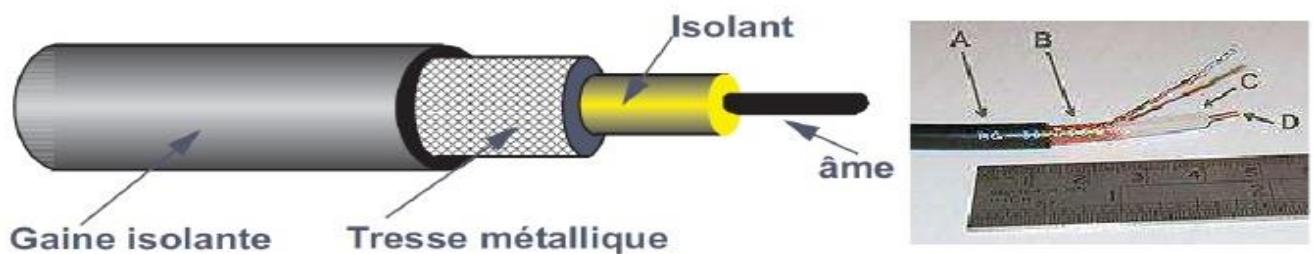


Figure 4 : Câble coaxial flexible type RG-59. A: Gaine extérieure en plastique B: Blindage en cuivre C: Diélectrique D: Conducteur central (*âme*) en cuivre.

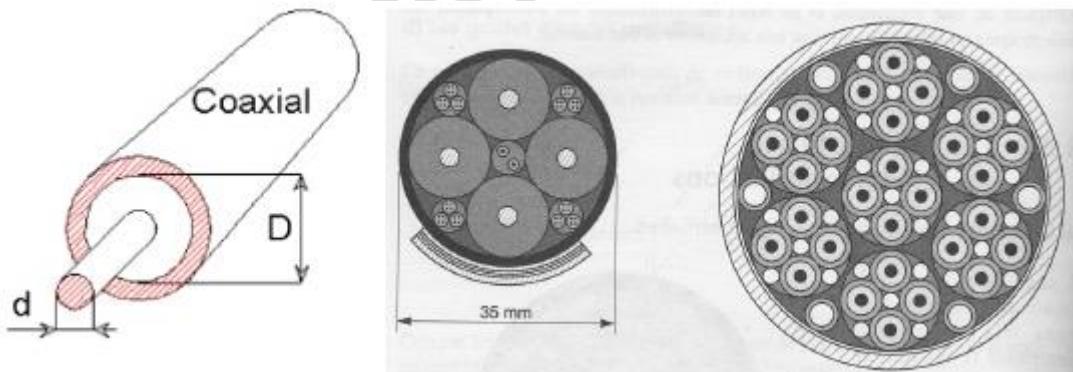


Figure 5: Câbles coaxiales

Grâce à sa constitution et son blindage, un 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. Il est maintenant remplacé par de 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.

En transmission numérique, notamment dans les réseaux locaux, on utilise des câbles d'impédance 50Ω à des débits pouvant atteindre 10 Mbit/s sur des distances de l'ordre du kilomètre. En transmission analogique, le câble coaxial est utilisé pour réaliser des liaisons longues distances. Son impédance est de 75Ω . Ce câble, similaire au câble coaxial utilisé en télévision La bande passante est d'environ 300 à 400 MHz. - pertes faibles, - bande passante (débit) élevée.

Le câble coaxial

C'est un câble utilisé également en téléphonie, télévision, radio-émetteur, récepteur, aéronautique, laboratoire de mesures physiques, etc. Il est constitué d'un cœur en fil de cuivre. Ce cœur est dans une gaine isolante polyvinyle ou téflon, elle-même entourée par une tresse de cuivre, le tout est recouvert d'une gaine isolante.

Sa bande passante maximum est d'environ 150 MHz. Les pertes de signal sont de nature multiple sur un câble coaxial : l'augmentation de la longueur du câble, l'augmentation de la fréquence et la diminution du diamètre du conducteur mènent à des pertes de signal.

Voici les différentes normes de l'Ethernet en matière de câble coaxial :

- 10 Base 2 ou Ethernet fin : 10 Mbit/s sur 200 m maximum, diamètre 5 mm, connecteur de type coupleur BNC en T Femelle/Mâle/Femelle, 30 postes maximum.
- 10 Base 5 ou Ethernet épais : 10 Mbit/s sur 500 m maximum, diamètre 10 mm, connecteur de type coupleur BNC en T Femelle/Mâle/Femelle, 100 postes maximum.
- 10 Broad 36 : 10 Mbit/s sur de longue distance.

Le BNC est un réseau qui ne doit pas être coupé, n'oubliez donc pas les bouchons de 50 ohms de terminaison, ils éliminent les "réverbérations sur le câble" : le signal transmis revient sur le câble et les stations croyant à un signal véritable attendent que la ligne soit libre.

Ligne ou câble coaxial

Le **câble coaxial** ou **ligne coaxiale** est une [ligne de transmission](#) ou [liaison asymétrique](#), utilisée en [hautes fréquences](#), composée d'un [câble](#) à deux [conducteurs](#).

L'âme centrale, qui peut être mono-brin ou multi-brins (en [cuivre](#) ou en cuivre argenté, voire en acier cuivré), est entourée d'un matériau [diélectrique](#) (isolant). Le diélectrique est entouré d'une tresse conductrice (ou feuille d'aluminium enroulée), puis d'une gaine isolante et protectrice.

Sa forme particulière permet de ne produire (et de ne capter) aucun flux net extérieur. Ce type de câble est utilisé pour la transmission de signaux numériques ou analogiques à haute ou basse fréquence. L'invention en est attribuée à l'américain [Herman Affel](#) (1893-1972), dont le brevet est accepté le [8décembre1931¹](#).

Principe

Câble coaxial flexible de type RG-59

A : Gaine extérieure en plastique

B : Blindage en cuivre

C : Diélectrique

D : Conducteur central (âme) en cuivre

Les deux conducteurs de pôles opposés d'un câble coaxial sont de natures différentes (sur une [ligne bifilaire](#), constituée de deux conducteurs parallèles séparés par un diélectrique, ils sont indifférenciés) : l'âme, qui est le conducteur central en cuivre est entourée d'un matériau isolant, puis d'un blindage qui est le second conducteur, généralement constitué de tresses de cuivres. La caractéristique spécifique de ce type de câble est que les axes centraux de symétrie des deux conducteurs se confondent : la conséquence est qu'ils subissent les mêmes perturbations induites par les champs électromagnétiques environnants. Le blindage évite aussi que les conducteurs ne produisent des perturbations vers le milieu extérieur.

Le signal utile est égal à la différence de [tension](#) entre les deux conducteurs. En théorie, quand les axes sont parfaitement confondus, les champs magnétiques extérieurs créent le même gain (ou la même perte) de potentiel sur les deux parties du câble. La tension induite (crée par les champs perturbateurs) est donc nulle, et le signal est transmis sans perturbation.

Usages

Par exemple, il est possible de trouver un câble coaxial :

- entre une antenne TV (« râteau » [TNT](#) ou [parabole](#) satellite) et un récepteur de [télévision](#) ;
- dans les réseaux câblés urbains ([télévision par câble](#) et accès à Internet : [DOCSIS](#)) ;
- entre un émetteur et l'antenne d'émission, par exemple une carte électronique [Wi-Fi](#) et son antenne ;
- entre des équipements de traitement du son (microphone, amplificateur, lecteur CD...) ;
- dans les réseaux de transmissions de données tels qu'[Ethernet](#) dans ses anciennes versions : [10BASE2](#) et [10BASE5](#) ;
- pour les liaisons inter-urbaines téléphoniques et dans les [câbles sous-marins](#) ;
- pour le transport d'un signal vidéo, exemple caméra filaire déportée, sur des distances significatives (plusieurs dizaines de mètres).

Le câble coaxial est progressivement remplacé depuis la fin du XX^e siècle par la [fibre optique](#) pour les utilisations sur de longues distances (supérieures à un kilomètre).

Un câble coaxial peut être placé le long des murs, gouttières ou enfoui car la présence d'objets n'influence pas la propagation du signal dans la ligne. Les pertes sont importantes au fil du temps, les particules de poussières se déposant sur le support isolant n'ayant pas d'influence sur la propagation du signal. Il est parfois nécessaire de placer, entre la sortie de l'antenne (symétrique) et la ligne coaxiale (asymétrique) un [balun](#) (*BALanced/UNbalanced*, convertisseur symétrique/asymétrique) pour optimiser le transfert de l'énergie entre l'antenne et le câble (en réception comme en émission). La connexion à un câble coaxial doit être réalisée par l'utilisation de connecteurs coaxiaux adaptés au câble et montés en respectant les indications fournies pour conserver à l'ensemble les caractéristiques souhaitées sur le plan de la qualité de transmission (voir par exemple le [connecteur BNC](#)). Pour la TV Numérique Terrestre, les fiches IEC 60169-2² sont désignées, alors que pour la TV par satellite ce sont les [fiches F](#) à visser, bien qu'elles soient montées sur un même type de câble « grand public ».

Il est préférable de ne pas utiliser de câble endommagé car ses caractéristiques et ses propriétés sont alors dégradées et les ondes pourraient déborder (rayonner) vers l'extérieur.

Caractéristiques

Elles sont données par les constructeurs³.

Caractéristiques mécaniques du câble coaxial :

- la nature du conducteur et ses dimensions ;
- les diamètres intérieur de la gaîne et extérieur du conducteur central (celui-ci est parfois creux) ;
- la nature du diélectrique.

Caractéristiques électriques du câble coaxial :

- son impédance caractéristique Z_c , standardisée à 75 ohms pour la TV (SAT et TNT), la radio FM, la vidéo ou l'audio, et à 50 ohms pour l'instrumentation ou la connexion d'antennes Wi-Fi, les hyperfréquences et les anciens réseaux ethernet, de même que les installations d'émission en général ;
- sa constante d'affaiblissement α à une fréquence donnée, qui traduit les pertes dans la ligne.

Pertes

Les courants haute fréquence circulent dans une pellicule proche de la surface des conducteurs. L'épaisseur de cette pellicule diminue quand la fréquence augmente. La résistance d'un conducteur augmente comme la racine carrée de la fréquence ; c'est ce qu'on appelle l'« effet pelliculaire ».

Les pertes produisent une diminution de l'amplitude du signal en fin de ligne ; cela se manifeste par exemple par une diminution de la puissance RF rayonnée dans le cas d'un émetteur. Voici quelques règles :

- Plus le diamètre du conducteur est petit, plus grande sera sa résistance, et donc plus il y aura de pertes ;
- Plus la fréquence augmente, plus il y aura de pertes ;
- Plus on augmente la longueur du câble, plus il y aura de pertes ;
- 19 Vatc = perte de 19 dB/100 mètres à une fréquence de référence de 800 MHz (790 précis) ;
- 17 Vatc = perte de 17 dB/100 mètres à une fréquence de référence de 800 MHz.

En réception satellite (B.I.S 950/2150 MHz) le câble 17 Vatc ou Patc est préconisé, ainsi que pour la réception (C 21/60) de la TV terrestre numérique (TNT) « délicate ». En d'autres termes, pour une installation TV terrestre monoprise, avec une longueur de descente d'antenne standard, jusqu'à 20/25 mètres, la dégradation (atténuation) est contenue, de l'ordre de 4,5 dB.

Les pertes en mode satellite à la fréquence maximale de 2 150 MHz, oscillent autour de 31 dB/100 m.

En outre, il existe un rapport optimum du diamètre de l'âme sur celui du blindage. Celui-ci correspond à une impédance caractéristique de 75Ω , ce qui explique que cette valeur soit employée pour les câbles de réception qui doivent minimiser les pertes, toutes choses étant égales par ailleurs.

Pour le transport de puissance, on aurait tendance à penser que maximiser le diamètre de l'âme diminue la résistance et donc les pertes. Ceci est vrai en continu, mais en haute fréquence, l'épaisseur réduite du diélectrique entraîne une tension de claquage plus faible, et donc une puissance maximale admissible limitée. L'optimum se réalise pour une impédance caractéristique de l'ordre de 30Ω . La valeur de 50Ω correspond à un compromis entre pertes en émission et pertes en réception.

Chapitre 3. Fibres Optiques (4 Semaines)

Caractéristiques, types de fibres optiques, avantages, domaines d'application de la fibre optique (télécommunications, médecine, capteurs (température, pression, ... etc.), éclairage).

Chapitre 3

Fibres Optiques

5. Introduction

La fibre optique

D'apparition plus récente, la fibre optique est apparue en 1987 mais je l'utilisais au début des années 1980 pour l'éclairage des instruments de bord sur les aéronefs. C'est l'avenir pour nos éclairages publics et particuliers ainsi que pour nos télécommunications. Cela nous permettrait l'économie de quelques centrales nucléaires à l'échelle du pays.

Fibre optique en silice

Son utilisation prend de l'ampleur de jour en jour, elle permet des débits de plusieurs Gbit/s sur de très longues distances. La fibre optique est particulièrement adaptée à l'interconnexion de réseaux, par exemple entre plusieurs bâtiments d'un même site, ou même la simple connexion d'un ordinateur à un amplificateur son.

D'un point de vue technique, une fibre optique est constituée d'une fibre de silice entourée d'une gaine de quelques micromètres qui emprisonne la lumière, et recouverte d'un isolant. À une extrémité, il y a une diode électroluminescente ou une diode laser qui émet un signal lumineux. À l'autre extrémité, il y a une photodiode ou un phototransistor qui est capable de reconnaître ce signal.

Les grands avantages de la fibre optique par rapport aux autres supports filaires sont : peu de perte de signal, vitesse de transmission élevée, faible poids, immunité aux interférences électromagnétiques, pas d'échauffement, etc.

Deux types de fibres sont utilisés : la fibre monomode (SMF - Single Mode Fiber) et la fibre multimode (MMF - Multi Mode Fiber). En optique, le mode c'est le nombre de chemins possible pour un signal lumineux. Dans une fibre multimode, la lumière peut emprunter un grand nombre de chemins alors que dans une fibre monomode, elle est prisonnière d'un trajet direct. La fibre monomode est une fibre plus performante que la fibre multimode, mais elle nécessite l'utilisation de sources lumineuses (laser) très puissantes.

Voici les différentes normes de l'Ethernet en matière de fibre optique :

- FOIRL (FiberOptic Inter Repeater Link / lien inter-répéteur sur fibre optique) : le standard original pour l'Ethernet sur la fibre optique. Vitesse de 10 Mbps.
- 10 Base-FL : mise à jour du standard FOIRL, vitesse de 10 Mbps.
- 100 Base-FX : vitesse de 100 Mbps.
- 1000 Base-LX : monomode, vitesse de 1000 Mbps, portée de 3 km.
- 1000 Base-LX : multimode, vitesse de 1000 Mbps, portée de 550 m.
- 1000 Base-SX : multimode, diamètre de 50 micromètres, vitesse de 1000 Mbps, portée de 550 m.
- 1000 Base-SX : multimode, diamètre de 64 micromètres, vitesse de 1000 Mbps, portée de 275 m.
- 1000 Base-LH : vitesse de 1000 Mbps, portée de 70 km.
- 10G Base-SR : multimode, vitesse de 10 Gbps, portée de 26 à 82 m.
- 10G Base-LX4 : multimode, vitesse de 10 Gbps, portée de 240 à 300 m.
- 10G Base-LX4 : monomode, vitesse de 10 Gbps, portée de 10 Km.
- 10G Base-LR et ER : monomode, vitesse de 10 Gbps, portée de 10 à 40 Km.

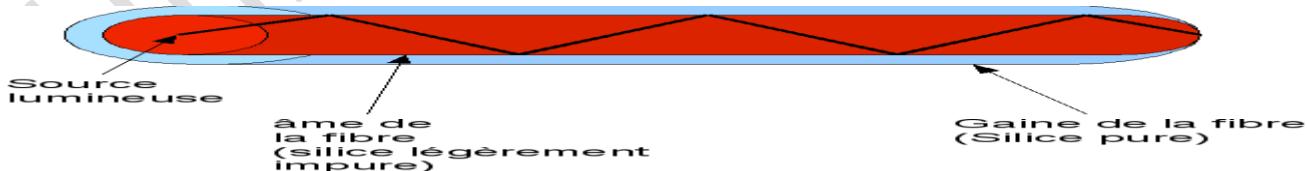
Enfin, la bande passante d'une fibre optique étant très large (plusieurs MHz), il est aisément de faire du multiplexage fréquentiel pour faire transiter simultanément plusieurs communications.

La technologie actuelle des fibres optiques permet d'envisager une bande passante dépassant largement 50 000 Gbit/s (50Tbit/s). La recherche s'oriente naturellement vers des matériaux et des technologies encore plus performants. La limitation actuelle, d'environ 10 Gbit/s est due à notre incapacité à effectuer plus rapidement la conversion entre les signaux électriques et optiques, bien qu'en laboratoire on atteigne un débit de l'ordre de 100 Gbit/s sur une seule fibre.

Un système de transmission optique possède 3 composants :

- Une source de lumière (l'émetteur)
- Un support de transmission (la fibre)
- Un détecteur de lumière (le récepteur)

Par convention, une impulsion de lumière indique un bit à 1 et l'absence de lumière, un bit à 0.



Principe de la fibre optique

Le schéma ci-dessus n'illustre qu'un seul rayon piégé. Mais comme tout rayon, dont l'incidence atteint l'angle critique, subit une réflexion interne, de nombreux rayons se propagent sous différents angles dans la fibre. On dit que chacun a un *mode* différent. On parlera alors de *fibre multimode*.

Toutefois si le diamètre de la fibre est réduit dans des proportions telles qu'un seul rayon lumineux puisse s'y propager, alors la fibre agit comme un guide d'ondes et la lumière ne peut se propager

qu'en ligne droite, sans réflexion. On obtient alors une *fibre monomode*. Elle est plus chère que la fibre multimode, mais est largement utilisée sur des distances plus longues. Les fibres monomodes disponibles actuellement permettent de transmettre des données à 50 Gbit/s sur 100 Km sans amplification, et des débits supérieurs ont même été atteints en laboratoire sur des distances plus courtes (10 Tbit/s).

Une fibre optique est constituée de verre de silice. La silice, tirée du sable, est une matière première peu coûteuse et disponible en quantité infinie. La pureté du matériau utilisé pour la fabrication des fibres est telle que si les océans en étaient constitués, à la place de l'eau, les fonds seraient visibles depuis la surface.

Vous trouverez ci-dessus, le spectre d'exploitation de la fibre optique en fonction de ses propriétés d'atténuation

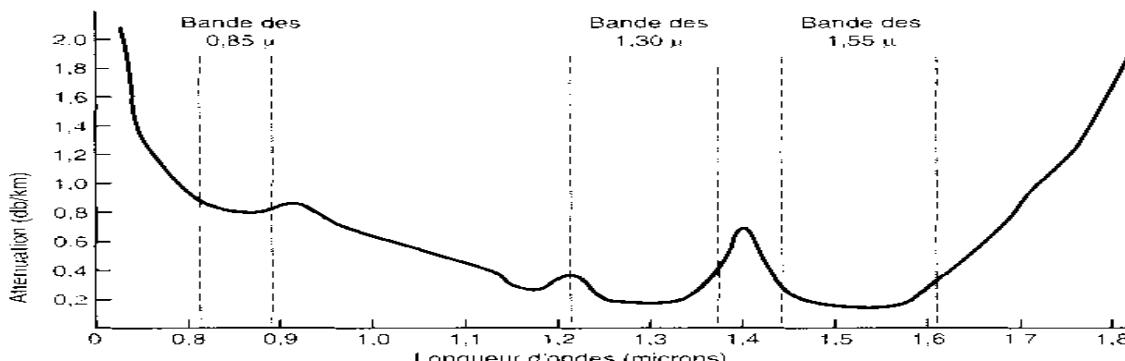


Figure 2.6 • Atténuation de la lumière dans une fibre optique dans la zone des ondes infrarouges du spectre.

La communication optique utilise 3 bandes de longueur d'ondes centrées respectivement sur :

- 0,85 microns
- 1,30 microns
- 1,55 microns

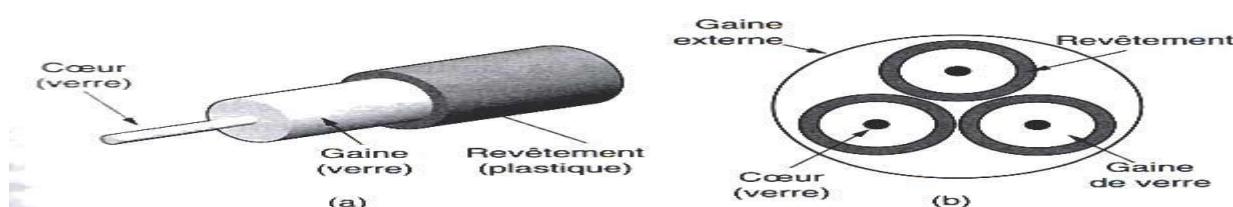
Comme vous pouvez l'apercevoir sur le graphique de l'atténuation, les deux dernières bénéficient de bonnes caractéristiques d'atténuation (moins de 5% par Km).

La raison de l'exploitation de la bande des 0,85 microns s'explique du fait qu'elle a l'avantage de permettre que les lasers et les diodes électroluminescentes soient constituées de la même matière : *L'arseniure de gallium*

5. Câbles à fibre optique

Au centre d'un câble à fibre optique se trouve le cœur en verre dans lequel la lumière est propagée.

Dans une fibre multimode, le diamètre de ce cœur est de l'ordre de 50 microns (à peu près l'épaisseur d'un cheveux) alors qu'il varie de 8 à 10 microns dans une fibre monomode.



Vue en coupe de fibres optiques

Le cœur est entouré d'une gaine de verre dont l'indice de réfraction est inférieur à celui du cœur afin d'empêcher le rayon lumineux de quitter celui-ci.

Les câbles optiques sont généralement enfouis dans le sol, à un mètre de profondeur, où il leur arrive parfois d'être endommagés par une pelleteuse ou un rongeur.

Près du littoral, les câbles transocéaniques sont enfouis dans des tranchées creusées au moyen d'une charrue sous-marine.

Dans les eaux profondes, ils reposent simplement sur le fond où ils peuvent être accrochés par des chaluts ou malmenés par des calmars géants.

5.1. Interconnexion

L'interconnexion des fibres optiques peut être réalisée de 3 façons.

- Par un *connecteur* reliant chaque extrémité d'une fibre par une prise. Ces connecteurs provoquent une perte de lumière de l'ordre de 10 à 20% mais facilitent la configuration des systèmes
- Par *épissure mécanique*. Pour cela, on doit aligner les deux fibres à joindre, soigneusement coupées, dans un manchon spécial qui les maintient en place. On peut améliorer l'alignement en envoyant de la lumière à travers la jonction et en procédant aux ajustements nécessaires pour maximiser le signal. Les épissures mécaniques requièrent une intervention de 5 minutes par du personnel qualifié et provoquent une perte de signal lumineux de l'ordre de 10%.
- Par *fusion*. A cette fin, leurs extrémités sont fondues et forment un raccordement solide. Une épissure par fusion donne un excellent résultat, comme s'il s'agissait d'une seule et unique fibre, mais il se produit quand même une faible atténuation.

5.2. Production du signal lumineux

Le signal lumineux est produit par deux types de sources :

- Les diodes électroluminescentes (LED, *Light Emitting Diode*)
- Les diodes Laser

5.3. Comparaison entre la fibre optique et le fil de Cuivre

5.3.1. Avantages de la fibre

- Bande passante bien plus large
- Faible atténuation, un répéteur tous les 50 Km environ (un répéteur tous les 5 Km pour le Cuivre)
- Elle n'est pas affectée par les surtensions électriques, les interférences électromagnétiques, les pannes de courant
- Insensible à la corrosion chimique due à l'air ambiant. Elle peut convenir aux environnements industriels agressifs
- Elle est fine et légère (1 000 câbles à paires torsadés d'1 Km de long pèsent environ 8 000 Kg. Deux fibres de même longueur pèsent 100 Kg et offrent une plus grande capacité)
- La côte à la revente du Cuivre permet une migration vers la fibre assez avantageuse
- Coût à l'installation inférieur au final
- Sécurité (la fibre n'étant pas sujette à l'écoute passive et très peu sensible à l'écoute active)

5.3.2. Inconvénients de la fibre

- Technologie encore nouvelle

- Nécessite des compétences que tous les ingénieurs n'ont pas
- Elle ne supporte pas d'être pliée
- Elle peut être facilement endommagée
- Les communications bidirectionnelles nécessitent l'usage de deux fibres, ou de deux bandes de fréquences dans une fibre
- Les interfaces de couplage avec la fibre sont plus chères que celle pour le câble électrique

1. Les liaisons optiques :

* Fibre optique : Support de verre transportant les informations binaires en modulant un faisceau lumineux. La fibre optique autorise des débits élevés et permet de couvrir des distances importantes.

- pertes faibles à très faibles,
- immunité aux bruits,
- bande passante (débit) élevée à très élevée,
- mise en œuvre délicate.

Il existe deux types de liaisons optiques :

- Liaison par fibre optique (optique guidée).
- Liaison optique en espace libre (exemple : liaison infrarouge télécommande-téléviseur).

2. Principe :

Un faisceau de lumière (figure 1), au passage d'un milieu 1 vers un milieu 2 (dioptre), est réfléchi (retour au milieu d'origine) et est réfracté avec une déviation (passage dans le milieu 2).

L'indice de réfraction (n_1, n_2) mesure le rapport entre la vitesse de propagation du rayon lumineux dans le vide et celle dans le milieu considéré, soit : $n=c/v$

Où (n) est l'indice de réfraction absolu du milieu considéré.

(c) la vitesse de la lumière dans le vide ($3 \cdot 10^8$ m/s).

(v) la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu considéré.

Par exemple, l'indice de réfraction du vide est évidemment de 1, celui du verre ordinaire d'environ 1,5 et de l'eau 1,33.

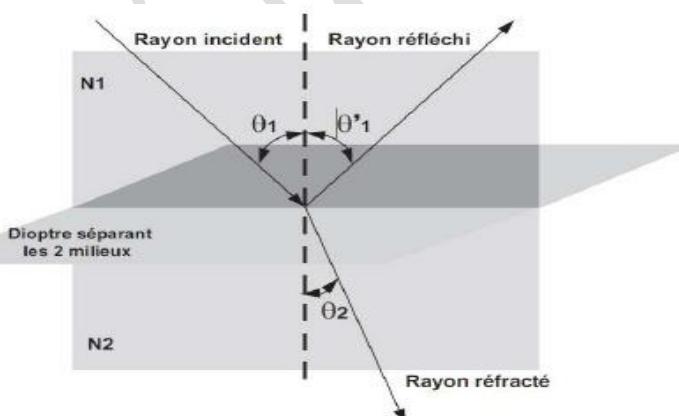


Figure 1 : La loi de Descartes ($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$)

Lorsque l'angle d'incidence augmente (θ_1), l'énergie réfractée diminue et l'énergie réfléchie augmente. Si on augmente encore l'angle, la réfraction devient nulle ($\theta_1 = \pi/2$, condition limite de la réfraction) toute l'énergie est réfléchie, la réflexion est totale. Cette propriété est utilisée pour réaliser des guides de lumière : la fibre optique. Une fibre optique (Figure 2) est composée d'un «fil» de silice appelé cœur, entouré d'une gaine appelée manteau et d'une enveloppe de protection. La réflexion totale est assurée par des valeurs d'indices proches tels que $n_1 > n_2$; où n_1 est l'indice du cœur et n_2 celui de la gaine.

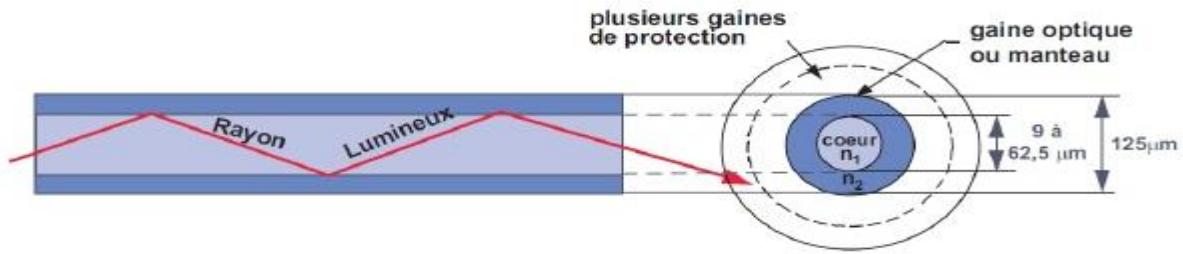


Figure 2 : La fibre optique : guide de lumière

Un système de transmission par fibre optique met en œuvre (Figure 3) :

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



Figure 3 : Principe d'une liaison optique.

La puissance émise par une LED est peu élevée ($\approx 1 \text{ mW}$) et, seul un faible pourcentage de cette puissance est récupéré dans la fibre. Pour les liaisons à haut débit on lui préfère les diodes LASER. Ces dernières autorisent une puissance à l'émission voisine de 5 mW avec un rendement de couplage d'environ 50 %. Une LED a une bande passante de 100 MHz , une diode LASER permet une largeur de bande de 800 MHz .

<u>EMETTEUR</u>	<u>DEL</u>	<u>LASER</u>
Mode de propagation	Multi mode	Multi mode ou monomode
Fenêtre	800 à 900 nm 1250 à 1350 nm	1300 nm 1550 nm
Bandé passante	$< 200 \text{ MHz}$	$> 1 \text{ GHz}$
Distance	Courte	Longue
Sensibilité à la température	Moyenne	Très forte
Durée de vie	Longue (100 000 h)	Courte (10 000 h)
Coût	Faible	Elevé

Tab: Comparaison entre LED et LASER

La fibre étant un système de transmission unidirectionnel, une liaison optique nécessite l'utilisation de 2 fibres. La figure 4 montre la réalisation de coupleurs optiques pour interconnecter deux réseaux locaux

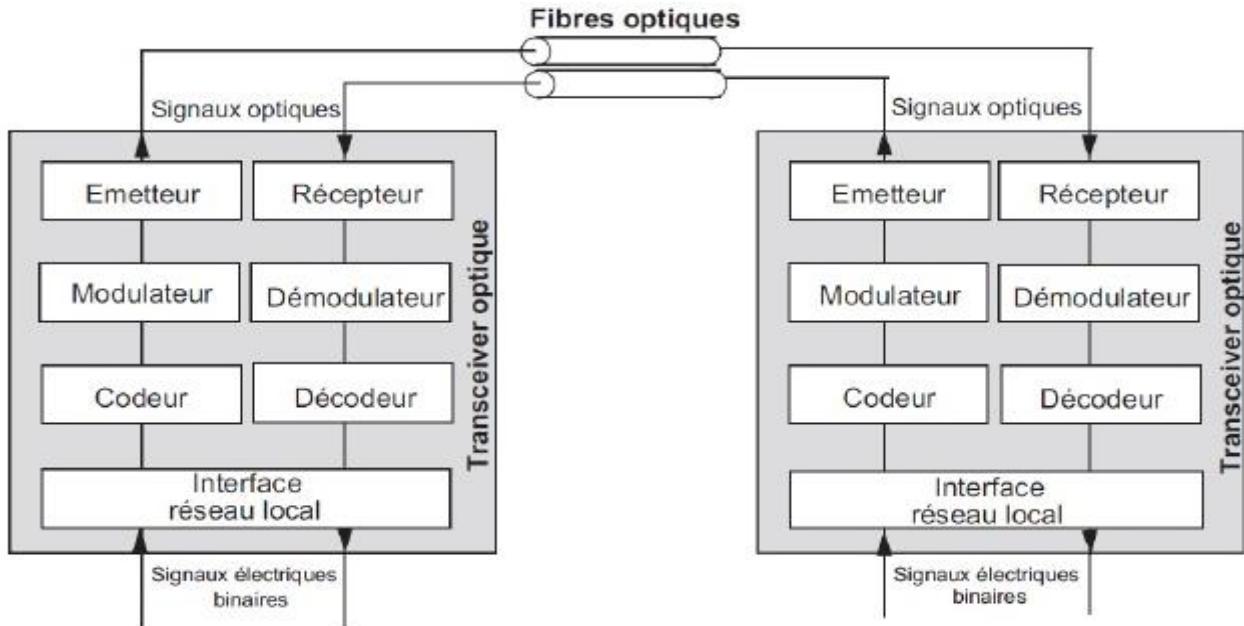


Figure 4 : Interconnexion de 2 réseaux locaux par fibre optique

3. Les différents types de fibres

Les rayons lumineux qui remplissent la condition de réflexion sont acheminés dans le cœur de la fibre. L'ensemble des rayons admis forme un cône, le cône d'acceptance dont l'ouverture ou angle d'incidence maximal est θ_{max} (Figure 5). L'ouverture numérique (ON) de la fibre est la grandeur qui qualifie le cône d'acceptance $ON = \sin \theta_{\text{max}}$.

3.2.1. Les fibres à saut d'indice :

Dans les fibres à saut d'indice, le cœur d'indice (n_1) est entouré d'une gaine d'indice (n_2). La variation d'indice entre le cœur et la gaine est brutale (saut d'indice). La propagation s'y fait par réflexion totale à l'interface cœur/gaine.

Quand le diamètre du cœur de la fibre est grand devant la longueur d'onde de la lumière, l'ouverture numérique est importante et permet un bon couplage optique. Ce type de fibre autorise l'utilisation de sources de faible puissance (LED). Cependant, la fibre admet plusieurs rayons qui se propagent sur des chemins différents ou modes de propagation. Ces différents trajets provoquent un étalement du signal (dispersion modale), la fibre est alors dite **multimode** (Figure 5). La dispersion modale provoque un étalement du signal, ce qui limite la bande passante de la fibre et la distance franchissable.

En réduisant le diamètre du cœur, on réduit l'ouverture numérique. Cette réduction, peut être telle que, pour une longueur d'onde donnée, la fibre n'admette plus qu'un seul rayon. La fibre est alors dite **monomode**, le diamètre du cœur est compris entre 8 et 9 μm et le diamètre du manteau 125 μm . La fibre n'est monomode qu'au-delà d'une certaine longueur d'onde appelée longueur d'onde de coupure ($\approx 1200 \text{ nm}$). La distance franchissable est de l'ordre de 100 km et la bande passante est supérieure à 20 GHz pour une fibre de 1 km. Si la fibre monomode permet de franchir de grandes distances, le couplage optique est faible et demande une source de puissance lumineuse supérieure. La fibre monomode exige l'emploi de diodes LASER, d'un coût plus élevé et d'une longévité réduite.

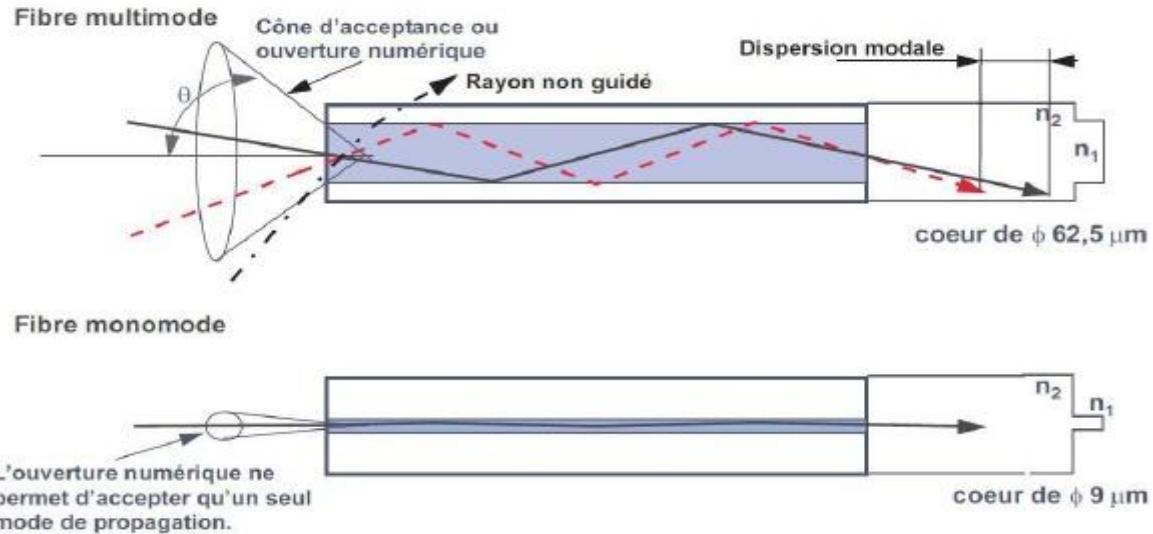


Figure 5 : Les fibres à saut d'indice.

3.2.2. Les fibres à gradient d'indice

Un compromis a été trouvé avec les fibres à gradient d'indice (figure 6), l'indice du cœur décroît de façon continue, depuis le centre du cœur jusqu'à l'interface cœur/gaine suivant une loi parabolique. Tous les rayons sont focalisés au centre de la fibre, ils ont une trajectoire proche de la sinusoïde. La vitesse de propagation est d'autant plus élevée que l'indice de réfraction est faible. Cette différence de vitesse tend à compenser les différences de trajet, elle réduit la dispersion modale et autorise une portée plus grande que dans les fibres multimodes à saut d'indice. La bande passante, pour une fibre d'un kilomètre est d'environ 500 MHz à 2 GHz et l'affaiblissement de 0,4 dB, ce qui autorise des portées d'environ 50 km.

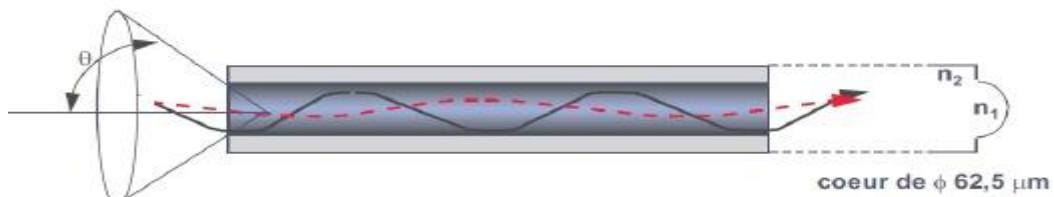


Figure 6 : Les fibres à gradient d'indice.

3.3. Performance des fibres optiques

Les performances des fibres optiques sont :

- Bande passante importante ;
- Immunité électromagnétique ;
- Faible taux d'erreur 10^{-12} ;
- Faible affaiblissement (0,2 à 0,5 dB/km) ;
- Faible encombrement et poids ;
- Vitesse de propagation élevée (monomode) ;
- Sécurité (absence de rayonnement à l'extérieur et difficulté de se mettre à l'écoute) ;
- Légereté.

Ces caractéristiques font des fibres optiques le support privilégié dans le domaine des télécommunications à haut débit et grande distance, dans les applications aéronautiques et navales (sous-marin) et dans les transmissions de données en milieu perturbé.

Chapitre 4. Faisceaux Hertziens (4 Semaines)

Généralités, principales fréquences et bandes ou canaux, liaisons satellite.

Chapitre 4

Faisceaux Hertziens

1. Les liaisons hertziennes : Principe

Un conducteur rectiligne alimenté en courant haute fréquence ou radiofréquence peut être assimilé à un circuit oscillant ouvert. Un tel circuit ou antenne d'émission rayonne une énergie (onde électromagnétique). Cette énergie électromagnétique recueillie par un autre conducteur distant ou antenne de réception est transformée en un courant électrique similaire à celui d'excitation de l'antenne d'émission (théorème de réciprocité). La figure 1 illustre le principe d'une liaison radioélectrique.

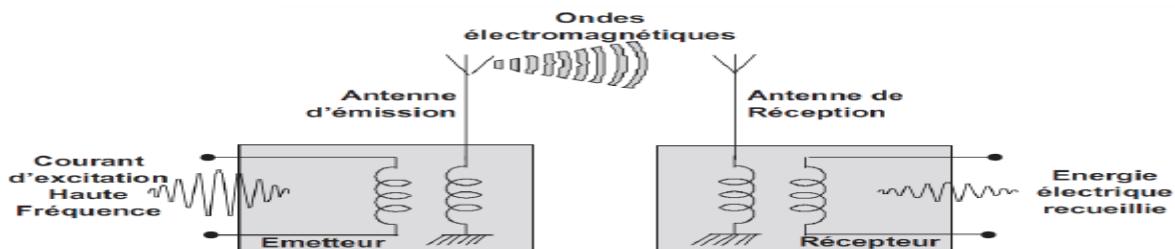


Figure 1 : Principe d'une liaison radioélectrique.

Contrairement aux supports étudiés dans les paragraphes précédents, la liaison entre les deux entités émetteur et récepteur s'effectue sans support physique. Les ondes électromagnétiques (OEM) se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière.

On appelle longueur d'onde (λ), la distance parcourue pendant une période du phénomène vibratoire.

Une antenne est un conducteur dont la longueur est un sous-multiple de la longueur d'onde. Le rayonnement d'une source ponctuelle est omnidirectionnel, l'énergie se diffuse selon une sphère. Le rayonnement d'un conducteur rectiligne s'effectue selon un demi-tore. Afin d'utiliser au mieux l'énergie rayonnée, on réalise des réflecteurs. Les réflecteurs peuvent être actifs (rideaux d'antennes) ou passifs (brins, réflecteur plan ou parabolique). Les ondes électromagnétiques subissent peu d'affaiblissement, leur mise en œuvre est assez aisée et le coût d'infrastructure généralement faible devant les coûts de génie civil engendrés par le passage de câbles physiques. Les transmissions par ondes électromagnétiques sont utilisées chaque fois qu'il est nécessaire :

- de diffuser une même information vers plusieurs utilisateurs (réseaux de diffusion),
- de mettre en relation des stations mobiles (réseaux de messagerie),
- de relier, à haut débit, deux entités éloignées (faisceaux hertziens) ou très éloignées (satellites de communication).

2. Intérêts et inconvénients

L'intérêt principal des liaisons hertziennes est qu'elles ne nécessitent pas de support physique entre l'émetteur et le récepteur de l'information. C'est le moyen de communication idéal pour les liaisons avec les objets mobiles: piétons, automobiles, bateaux, trains, avions, fusées, satellites, etc.. Les liaisons hertziennes sont intéressantes dans le cas de la diffusion (radio diffusion et télédiffusion), où l'on a un émetteur et

plusieurs récepteurs. En effet pour couvrir une ville, il est plus simple et moins cher d'installer un émetteur et une antenne chez chaque particulier, plutôt que de relier par câble chaque particulier !

Les inconvénients principaux des liaisons hertziennes (par rapport aux autres supports) sont aussi liés à l'absence de support physique :

- Comment faire pour que tout le monde puisse communiquer en même temps ? Ce problème n'existe pas par rapport à une liaison filaire : chacun son câble ! Dans le cas des liaisons hertziennes, ceci impose une gestion stricte des fréquences : Chaque système de transmission radio dispose d'une certaine bande de fréquence qui lui est allouée.
- Comment garantir la confidentialité de transmission entre l'émetteur et le récepteur ? N'importe quel « espion » peut intercepter une communication puisque l'information est transmise en « espace libre ». Cet inconvénient est corrigé par l'utilisation de cryptage de l'information entre l'émetteur et le récepteur.

3. Les systèmes utilisant les liaisons hertziennes

Quelques exemples de systèmes utilisant les liaisons hertziennes, la liste qui suit n'est, bien sûr, pas exhaustive.

- Radiodiffusion (en modulation d'amplitude ou de fréquence)
- Télédiffusion (analogique ou numérique, terrestre ou par satellite)
- Radiocommunications : Talkie-walkie, liaison VHF pour avions ou bateaux
- Faisceaux hertziens.
- Téléphonie : réseau de téléphones sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise, téléphone mobile.
- Internet : Liaison Wi-Fi (réseau Internet sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise).

4. Principales fréquences (Spectre électromagnétique) :

La figure ci-dessous donne une vue d'ensemble des rayonnements électromagnétiques. Les limites des diverses gammes ne sont pas définies très précisément.

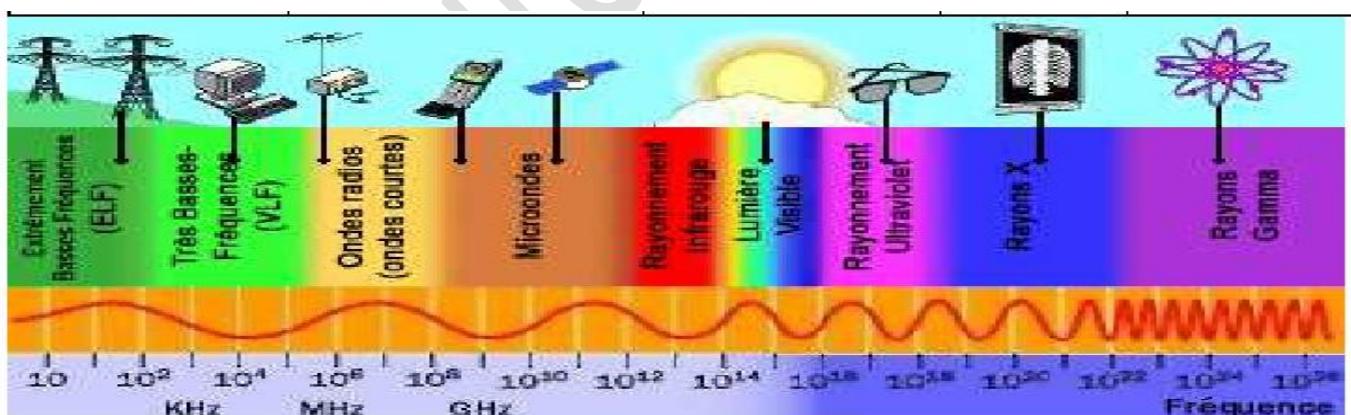


Figure 2 : Tableau des ondes kilométriques et métriques
Fréquence (N) Longueur d'onde λ λ λ

50 Hz 10 km Ondes radioélectriques RF

30 kHz 10 km Ondes kilométriques 100 kHz 3000 m 1 MHz 300 m 10 MHz 30 m 100 MHz 3 m Ondes métriques

5. Les faisceaux hertziens

Les ondes radioélectriques peuvent, dans certains cas, remplacer avantageusement les liaisons filaires (cuivre ou optique). Les faisceaux hertziens ou câbles hertziens, par analogie aux réseaux câblés peuvent être analogiques ou numériques. Les débits peuvent atteindre 155 Mbit/s. Ils sont principalement utilisés pour des réseaux :

- de téléphonie (multiplexage fréquentiel ou temporel),
- de transmission de données,
- de diffusion d'émissions télévisées.

Pour diminuer les puissances d'émission, la technique des faisceaux hertziens utilise des antennes très directives. L'antenne réelle est placée au foyer optique d'une parabole qui réfléchit les ondes en un faisceau d'ondes parallèles très concentré, limitant ainsi la dispersion de l'énergie radioélectrique. En réception, l'antenne est aussi placée au foyer optique de la parabole. Tous les rayons reçus parallèlement à l'axe optique de la parabole sont réfléchis vers le foyer optique, on recueille ainsi, le maximum d'énergie (figure 3).

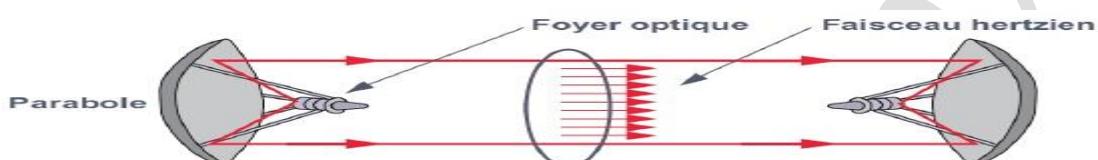


Figure 3 : Principe des faisceaux hertziens.

Les distances franchissables, par les systèmes de transmission hertzienne, peuvent atteindre 100 km. Pour couvrir des distances plus importantes, il faut disposer des relais. Les relais peuvent être passifs ou actifs. Les relais passifs sont utilisés dans les zones où le relief est important ; il s'agit de simples réflecteurs utilisés pour guider l'onde, par exemple pour suivre une vallée. Les relais actifs nécessitent une infrastructure plus complexe, le signal recueilli est remis en forme, amplifié puis retransmis. Les faisceaux hertziens utilisent les bandes de 2 à 30 GHz et autorisent des débits de 155 Mbit/s. Les faisceaux hertziens sont sensibles aux perturbations atmosphériques et aux interférences électromagnétiques. Une infrastructure hertzienne repose sur l'existence de canaux de secours qu'ils soient hertziens ou filaires. Les liaisons infrarouges et lasers constituent un cas particulier des liaisons hertziennes. Elles sont généralement utilisées, pour interconnecter deux réseaux privés, sur de courtes distances, de l'ordre de quelques centaines de mètres.

5.1. Zone de Fresnel

Pour qu'une transmission entre deux points puisse être considérée comme une transmission en espace libre, une zone, dite zone de Fresnel, doit être complètement dégagée. En radiocommunication on admet que l'énergie est transmise dans un volume ellipsoïdal comme le représente la figure 4.

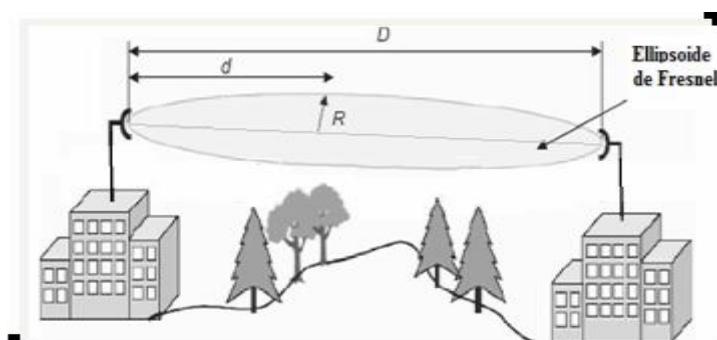


Figure 4 : Propagation en espace libre et zone de Fresnel

Les dimensions de l'ellipse sont données par les équations suivantes. On s'intéresse principalement au rayon de l'ellipse à une distance, ce résultat permettant notamment de déterminer la hauteur minimale des antennes :

Avec D et d en km, f en GHz et
Au milieu, le rayon est maximal et vaut :

La grandeur R correspond à la valeur strictement minimale pour laquelle l'espace entourant le rayon direct joignant les deux antennes est dégagé de tout obstacle.

Remarque : R est maximum pour $d_1 = d_2$ ou ($D=2d$).

6. Les liaisons satellitaires

La nécessité de disposer de stations relais rend difficile la réalisation de liaisons hertziennes à très grande distance, notamment pour les liaisons transocéaniques. C'est pourquoi dès les années 1960, on s'est orienté vers l'utilisation des satellites relais. Ce n'est qu'avec l'apparition de porteurs capables de satelliser sur des orbites d'environ 36000km qu'il a été possible de réaliser des liaisons permanentes avec des satellites fixes par rapport à un observateur terrestre (satellite géostationnaire). Ces satellites ont une période de révolution identique à celle de la Terre (23h 56min), ils sont dits géosynchrones. L'orbit équatoriale est de 42162 km, soit une altitude exacte au-dessus de la Terre de 35 800 km.

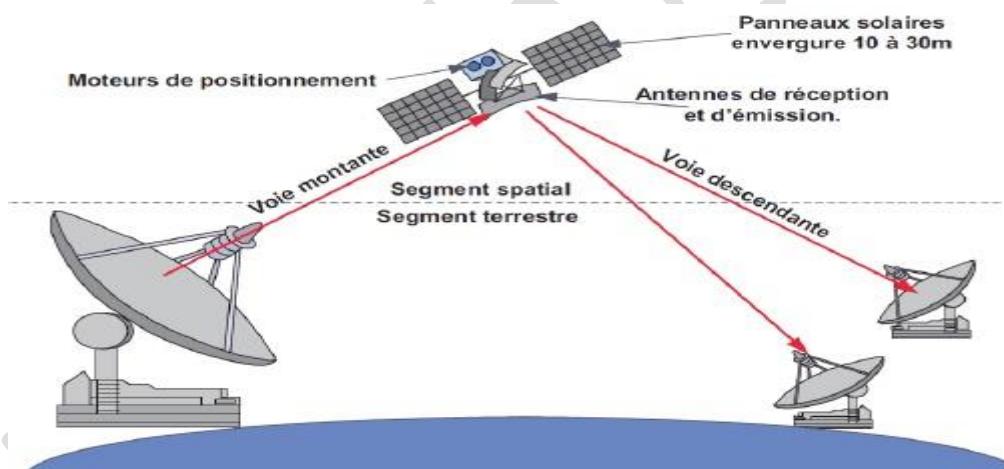


Figure 5 : Principe d'une liaison satellitaire.

6.1. Principe

Une station terrestre émet vers le satellite un flux d'information (voie montante). Le satellite n'est qu'un simple répéteur, il régénère les signaux reçus et les réemet en direction de la Terre (voie descendante). La figure 5 illustre le principe d'une liaison satellitaire.

Pour utiliser un satellite comme point nodal d'un réseau terrestre et, non comme simple relais de télécommunication, il est nécessaire d'admettre plusieurs voies montantes. Celles-ci sont alors en compétition pour l'accès au satellite. Plusieurs techniques peuvent être utilisées :

-FDMA (Frequency Division Multiple Access): Accès Multiple à Répartition de Fréquences: consiste à diviser la bande de fréquence du satellite en sous-bandes, chacune réservée à une voie de communication.

- **TDMA** (Time Division Multiple Access) (Accès Multiple à Répartition de Temps), la porteuse est commune à tous les canaux de communication, mais chaque canal n'en dispose que durant un intervalle de temps limité. Ce mode d'accès nécessite une synchronisation entre les stations.

- **CDMA** (Code Division Multiple Access) (Accès Multiple à Répartition par Code), dans cette technique on attribue à chaque voie de communication un code. Les informations codées sont envoyées simultanément, elles sont extraites du flux par décodage.

6.2. Les différents types de satellites

Compte tenu des temps de propagation des satellites géostationnaires, on a défini plusieurs familles d'orbite. On distingue 3 types de satellites, selon leur orbite:

- Les orbites stationnaires GEO (Geostationary Earth Orbital)
- Les orbites moyennes MEO (Medium Earth Orbital)
- Les orbites basses LEO (Low Earth Orbital)

Le tableau 1 résume les caractéristiques de ces satellites.

	GEO Geostationary Earth Orbit	MEO Medium Earth Orbit	LEO Low Earth Orbit
Altitude	36 000 km	2 000 à 12 000 km	800 à 2 000 km
Type d'orbite	Circulaire	Elliptique ou circulaire	Elliptique ou circulaire
Plan de rotation	Équatorial	Quelconque	Quelconque
Temps de transmission Terre-satellite	240 ms	110 à 150 ms	Environ 50 ms
Permanence spatiale et temporelle (Spatiale : communiquer en tout point Temporelle : en un point à tout moment)	OUI 3 satellites couvrent la terre (sauf les pôles)	NON (orbite défilante) Constellation de satellites	NON (orbite défilante) Constellation de satellites
Applications	Téléphonie fixe, télévision, transmission de données	Téléphonie mobile, transmission de données	Téléphonie mobile, transmission de données
Débit	Jusqu'à 155 Mbit/s	De 9,6 à 38 kbit/s	De 2,4 kbit/s à 155 Mbit/s

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques des différents systèmes de satellites.

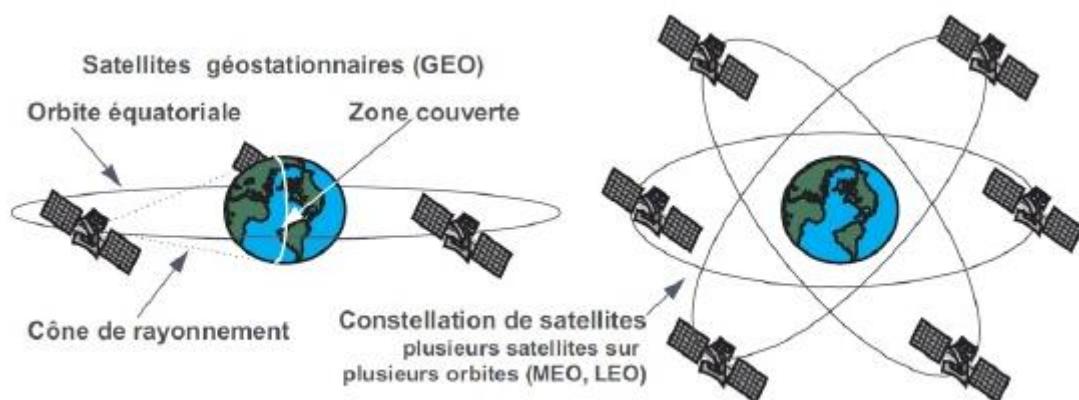


Figure 6 : Satellites géostationnaires (GEO) et constellation de satellites (MEO et LEO).

La figure 5 représente les deux modes orbitales des systèmes de satellites. La partie de gauche illustre un système GEO. En orbite équatoriale, avec un cône de rayonnement de 120°, seuls 3 satellites suffisent pour couvrir la Terre, sauf les pôles.

Les satellites géostationnaires permettent de réaliser :

- des réseaux de diffusion (radiodiffusion, télévision) ;
- des liaisons point à point ;
- des liaisons à haut débit (bande passante de 500 MHz).

Ces satellites ont un temps de propagation important (environ 240 ms) et un temps de vie limité de 10 à 15 ans par la consommation d'énergie nécessaire à leur maintien sur leur orbite. L'énergie motrice est embarquée, donc limitée, tandis que l'énergie nécessaire au système de télécommunication est fournie par des batteries et panneaux solaires.