



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
Université Dr. Tahar Moulay de Saida  
Faculté de Technologie  
Département Télécommunication

**POLYCOPIE DE COURS**

# Supports de Transmission

## **Cours**

Support destiné aux étudiants de Licence 3 Télécommunications

## **Présenté par :**

Dr. DAMOU Mehdi  
Maître de conférences « A » en Télécommunication  
2024



**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique  
Université Saida Dr. Moulay Tahar  
Faculté de Technologie**

**Département Télécommunication**

# **Supports de Transmission**

**Présenté par :**

**Dr. DAMOU Mehdi**

**Maître de conférences « A » en Télécommunications**

**Semestre: 5**

**Unité d'enseignement: UED 3.0**

**Matière: Supports de transmission**

**VHS: 22h30 (Cours: 1h30)**

**Crédits: 1**

**Coefficient: 1**

**Objectifs de l'enseignement:**

Les canaux et les supports de transmission forment la partie centrale des systèmes de télécommunications. Ils affectent souvent les signaux transmis par différents types de perturbations et de dégradations dues essentiellement à leurs caractéristiques. Connaître ces supports de transmission est une nécessité absolue pour les étudiants en télécommunications.

**Connaissances préalables recommandées:**

Télécommunications fondamentales, Télécommunications et applications.

**Contenu de la matière :**

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

Bande passante, atténuation, sensibilité aux bruits, impédance caractéristique, coefficients de réflexion, de transmission et rapport d'onde stationnaire (TOS).

**Chapitre 2. Conducteurs électriques (2 Semaines)**

Coaxiaux, paires torsadées, normes et catégories.

**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 4. Faisceaux Hertziens (4 Semaines)**

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

**Chapitre 5. Faisceaux lumineux (infrarouge et visible) en espace libre (2 Semaines)**

Spectres. Portées. Intérêts et limites. Sources infrarouge. Sources de lumière visible (Exemples : LED et Laser). Applications.

**Mode d'évaluation:**

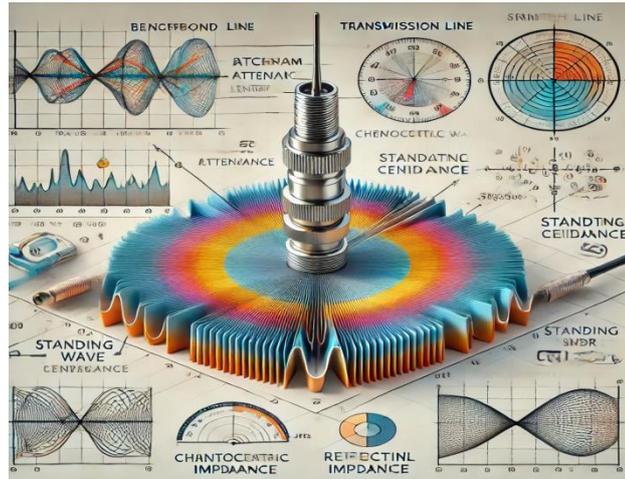
Examen: 100%

**Références bibliographiques:**

1. T. KAHAN, "Ondes hertziennes", Editeur. Paris : PUF, 1974.
2. P. F. Combes - "Transmission en espace libre et dans les lignes"; Dunod, 1988.
3. P. F. Combes, "Micro-ondes, circuits passifs, propagation, antennes, Cours et exercices", Dunod, 1997.
4. G. DUBOST, "Propagation libre et guidée des ondes électromagnétiques / Rayonnement -Exercices avec solutions et rappels de cours".
5. J. Quinet, "Théorie et pratique des circuits de l'électronique et des amplificateurs, Propagation du courant H.F. le long des lignes ; Abaque de Smith- Antenne. Equations de Maxwell et Applications".

6. J. M. Mur, "Les fibres optiques: Notions fondamentales (câbles, connectique, composants, protocoles, réseaux)", ENI Epsilon, 2012.
7. Z. Toffano, "Optoélectronique: Composants photoniques et fibres optiques", Ellipses, 2001.
8. D. A. Dealoue, "Télécommunications par fibres optiques", Sciences Technologie.
9. P. Lecoy, "Communications sur fibres optiques", Hermès, Lavoisier, 2014.
10. G. Barué, "Télécommunications et Infrastructure", Ellipses, 2002.
11. D. Présent, S. Lohier, "Transmissions et Réseaux, Cours et exercices corrigés", Edition Dunod, 2005.
12. D. Smith, J. Dunlop, "Telecommunications Engineering", CRC Press 3rd Edition 1994.
13. L. E. Frenzel, "Electronic Communication Systems", McGraw-Hill, New York, 1998.
14. W. Sinnema et R. McPherson, "Electronic Communications", Prentice-Hall, Scarborough.
15. C. W Davidson, M. Millan, "Transmission lines for Communication with CAD programs".
16. G. Maral, M. Bousquet, Z. Sun, "Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology". 5nd Edition. 2009
17. Manuel UIT sur les télécommunications par satellite, 3e éd., 2002, 1210 p.
18. Aerospace Law : Télécommunications Satellites, Montréal, McGill University, 1982, 354 p.

# 1



## Caractéristiques des supports de transmission

### Dans ce chapitre

---

- ↪ Bande passante
  - ↪ atténuation
  - ↪ sensibilité aux bruits
  - ↪ caractéristique, coefficients de réflexion, de transmission
  - ↪ rapport d'onde stationnaire (TOS)
-

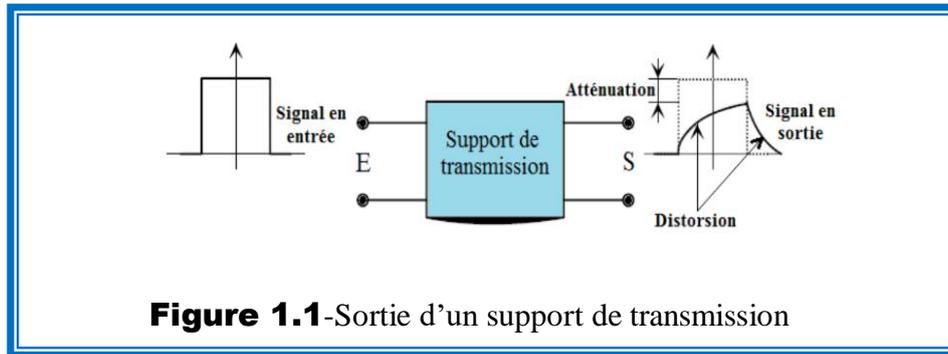
## Caractéristiques des Supports de Transmission

### 1. Introduction

Les supports de transmission affectent souvent les signaux transmis par différents types de perturbations et de dégradations dues essentiellement à leurs caractéristiques tels que: la bande passante, l'atténuation, sensibilité aux bruits. Dans ce chapitre, on présente les caractéristiques des supports de transmission : bande passante, atténuation, sensibilité aux bruits, impédance caractéristique, coefficient de réflexion et rapport d'onde stationnaire. Enfin, on termine par l'étude de l'Abaque de Smith permettant de déterminer graphiquement les paramètres d'un support de transmission.

#### 1.1. Bande Passante

Les supports de transmission ont une bande passante (une gamme de fréquence) limitée. Certains signaux s'y propagent correctement (ils sont affaiblis mais reconnaissables à l'autre extrémité), alors que d'autres ne les traversent pas (ils sont tellement affaiblis ou déformés qu'on ne les reconnaît plus à la sortie) (figure I.1). Intuitivement, plus un support a une bande passante large, plus il transporte d'informations par unité de temps. 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.



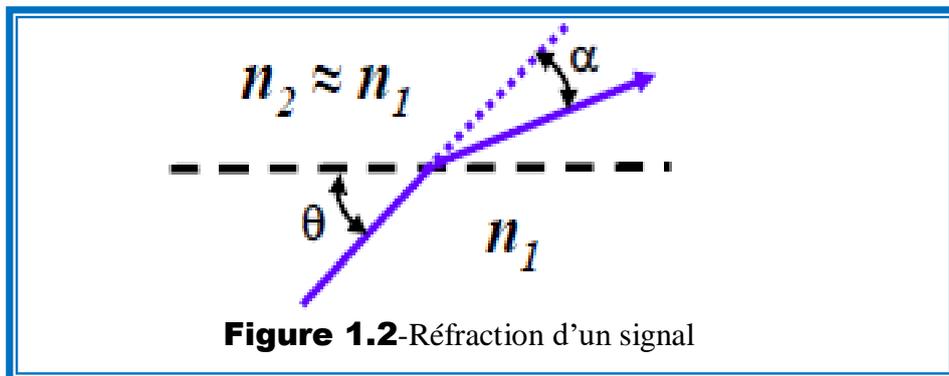
La bande passante est la bande de fréquences dans laquelle les signaux appliqués à l'entrée du support de transmission ont une puissance de sortie supérieure à un seuil donné après traversée du support. Le seuil fixé correspond à un rapport déterminé entre la puissance du signal d'entrée et la puissance du signal trouvé à la sortie  $P_e/P_s$ .

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'amputé 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.

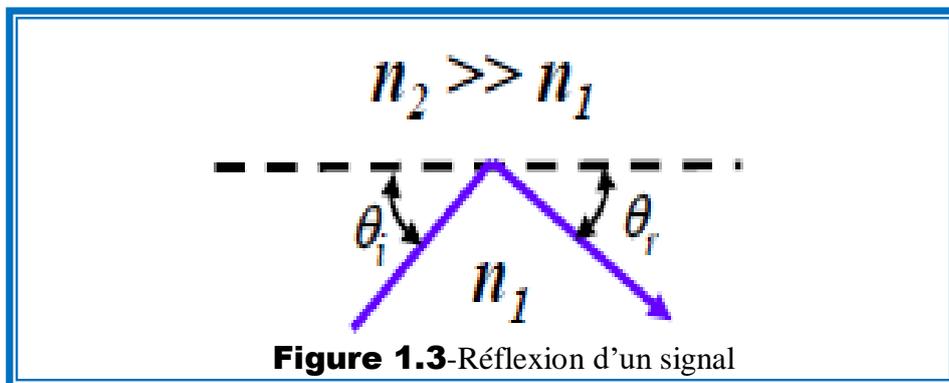
## 1.2. Atténuation

Un canal de transmission atténué (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. L'atténuation augmente avec la diminution de la fréquence et/ou de la distance. La quantité d'énergie perdue dépend très étroitement de la fréquence du signal et de la bande passante du système. De plus lors de la collision avec un obstacle, la valeur de l'atténuation dépend fortement de la nature des obstacles. Généralement les obstacles métalliques provoquent une forte réflexion, tandis que l'eau absorbe le signal. Lors qu'une onde électromagnétique rencontre un obstacle, ou un autre milieu différent, une partie de son énergie est absorbée et transformée, une partie continue à se propager de façon atténuée et une partie peut éventuellement être réfléchi. Il y a réflexion d'une onde électromagnétique sur une surface quand celle-ci est électriquement différente de son milieu de propagation (changement d'impédance du milieu et passage de  $n_1$  à  $n_2$ ).

Si  $n_2$  est peu différent de  $n_1$ , il y a simplement réfraction d'un angle  $\alpha$ , ), comme l'illustre la figure I.2.



Si  $n_2$  est très différent de  $n_1$ , il y a réflexion comme l'illustre la figure I.3.

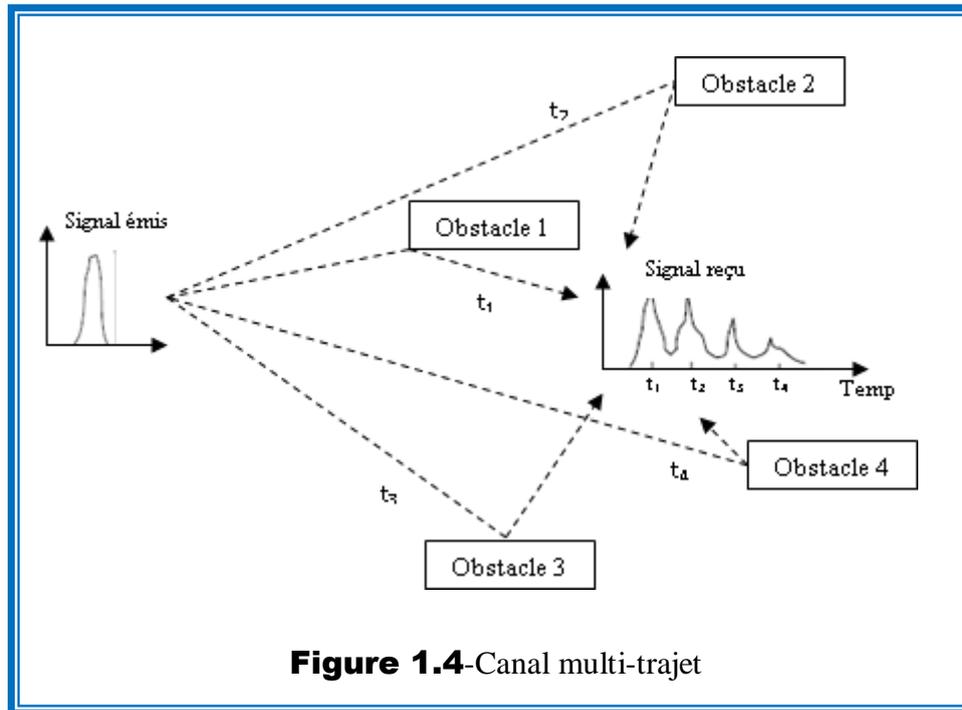


L'atténuation  $\alpha$  est donnée par la formule:

$$\alpha = 10 \times \log_{10}(P_s/P_e) \quad [dB] \quad (I.1)$$

Avec:  $P_s$  est la puissance de sortie et  $P_e$  est la puissance d'entrée

Une onde radio est susceptible de se propager dans plusieurs directions, c'est le cas d'un canal de transmission à trajet multiple (canal à évanouissement) comme représente la figure I.4. Ce phénomène provient des réfractions et réflexions successives du signal émis dans un environnement changeant. Un canal à trajets multiples introduit des atténuations et des retards variables avec le temps. Le signal résultant est égal à la somme des signaux, provient d'un même signal source, atténués et retardés différemment.



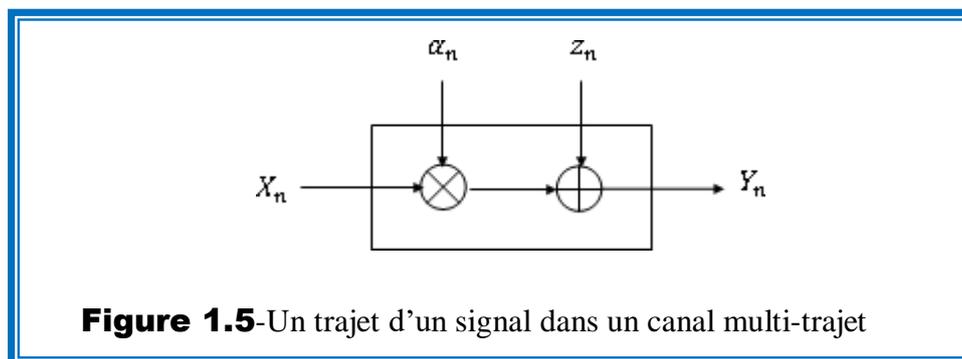
**Figure 1.4-**Canal multi-trajet

Le signal atténué, à la sortie du canal (figure I.5), à l’instant  $nT$ , est modélisée à l’aide de l’expression suivante :

$$Y_n = \alpha_n X_n + z_n \quad (I.2)$$

Où:

- $X_n$  représente le signal transmis à l’instant  $nT$  ;
- $Y_n$  est le signal reçu correspondant;
- $\alpha_n$  est l’atténuation aléatoire caractérisant le canal à l’instant  $nT$ ;  $z_n$  est le bruit.



**Figure 1.5-**Un trajet d’un signal dans un canal multi-trajet

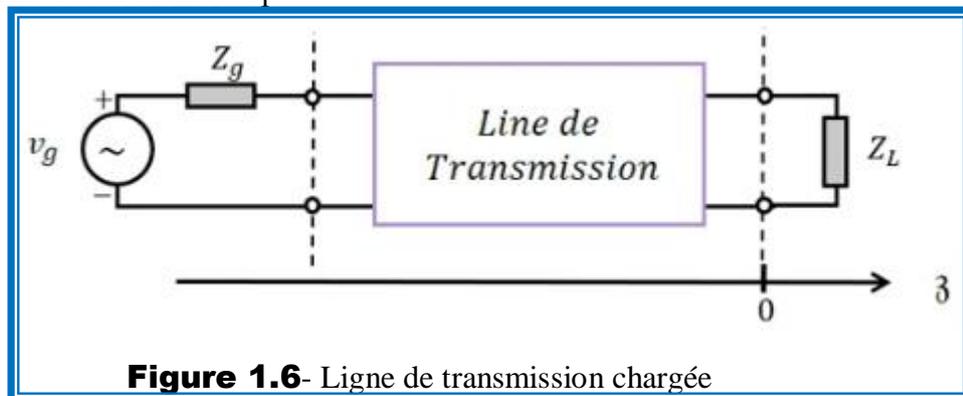
### 1.3. Sensibilité aux bruits

Les supports de transmission déforment les signaux qu’ils transportent, même lorsque leurs fréquences sont adaptées. Diverses sources de bruit perturbent les signaux : parasites, phénomènes de diaphonie... Certaines perturbations de l’environnement introduisent

également des bruits (foudre, orages pour le milieu aérien, champs électromagnétiques dans des ateliers...). 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 distingue généralement deux types de bruit : le bruit blanc et le bruit impulsif.

## 2. Support de transmission :

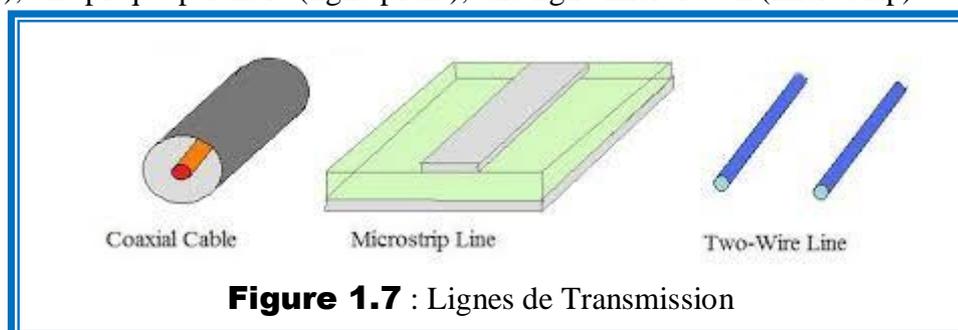
- ❖ Une ligne de transmission est un moyen beaucoup plus efficace que l'espace libre, qui permet de guider la puissance électromagnétique et l'information de la source à la charge.
- ❖ La source peut être un générateur, un émetteur, ou un oscillateur ; la charge peut être une antenne ou un oscilloscope...



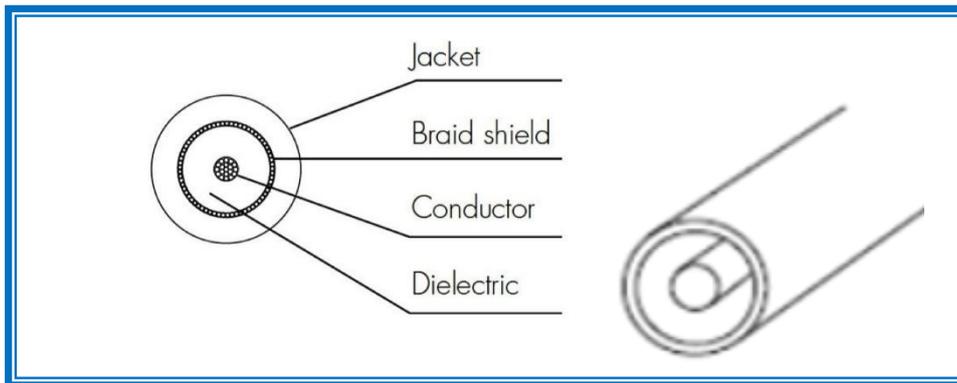
- ❖ Une ligne de transmission est un quadripôle reliant un générateur à une charge.
- ❖ Contrairement à la théorie des circuits, la longueur d'une ligne de transmission est le paramètre dans l'analyse des lignes de transmission.

### 2.1. Paramètres de la ligne de transmission

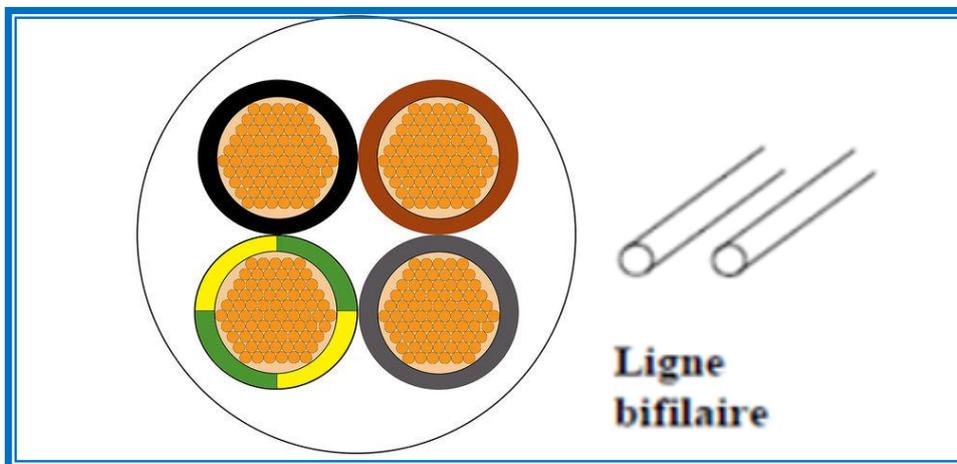
Les lignes de transmission comprennent un câble coaxial, une ligne à deux fils (bifilaire), une plaque parallèle (ligne plane), une ligne microruban (microstrip).



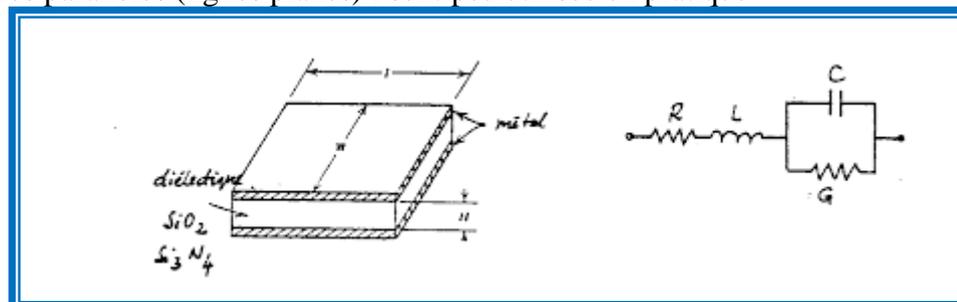
- A. Câble coaxial : utilisés dans les laboratoires électriques et pour connecter des téléviseurs à des antennes.



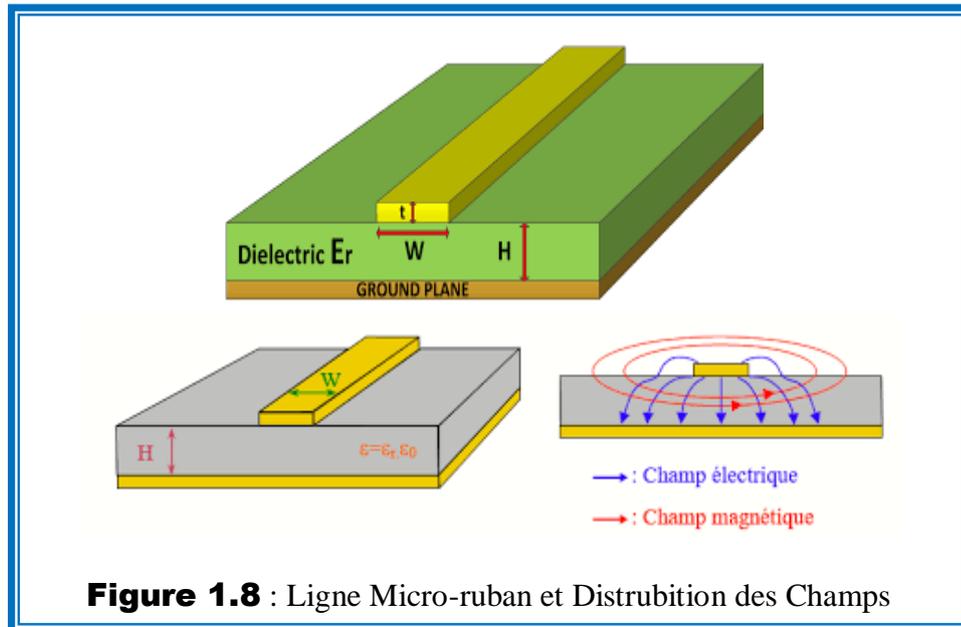
B. Ligne à deux fils (bifilaire) : est de moins utilisé (lignes électriques aériennes et les câbles reliant les téléviseurs à l'antenne).



C. Plaques parallèles (lignes planes) : sont peu utilisée en pratique

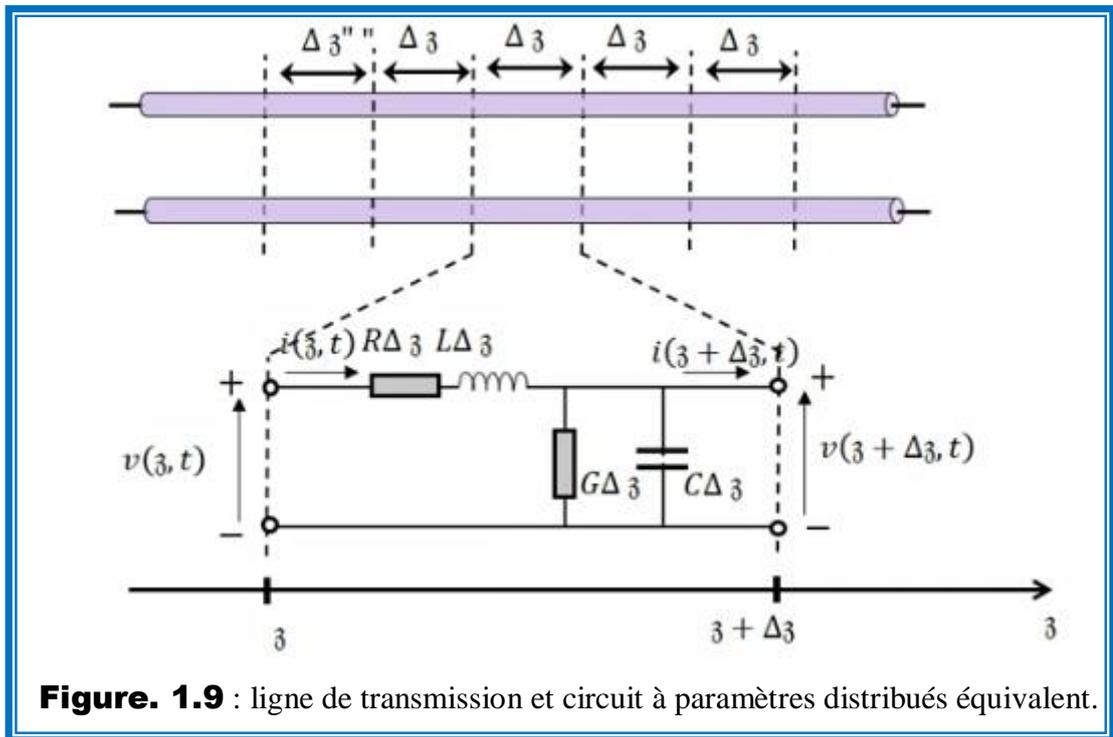


D. Ligne microruban (microstrip) : est le type le plus utilisé pour les circuits intégrés à haute fréquence.



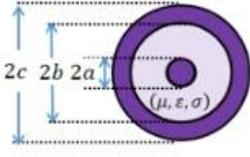
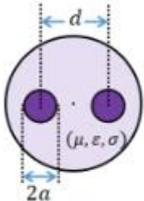
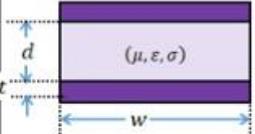
- ❖ Nous basons dans cette étude sur les lignes de transmission : « câble coaxial » et « ligne bifilaire » seulement.
- ❖ On peut analyser les caractéristiques de l'onde TEM propageant dans une ligne de transmission en utilisant :
  - **La théorie électromagnétique** : traite des champs électriques  $\vec{E}$  et magnétiques  $\vec{H}$ , qui sont des champs vectoriels se propageant à travers l'espace tridimensionnel.
  - **La théorie des circuits** : traite ondes de tension  $V = - \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$  et de courant  $I = - \int \vec{H} \cdot d\vec{l}$  qui sont de simples ondes scalaires unidimensionnelles.
- ❖ Pour cette raison, nous choisissons d'utiliser la théorie des circuits pour décrire le fonctionnement de la ligne de transmission.
- ❖ Une ligne de transmission peut être considérée comme un circuit électrique composé de quatre éléments de circuit :
  - $L$  : inductance en série [ $H/m$ ].
  - $C$  : capacitance parallèle [ $F/m$ ].
  - $R$  : résistance en série [ $\Omega/m$ ].
  - $G$  : conductance parallèle [ $S/m$ ]

- On analyse une petite section  $\Delta z$  de la ligne.



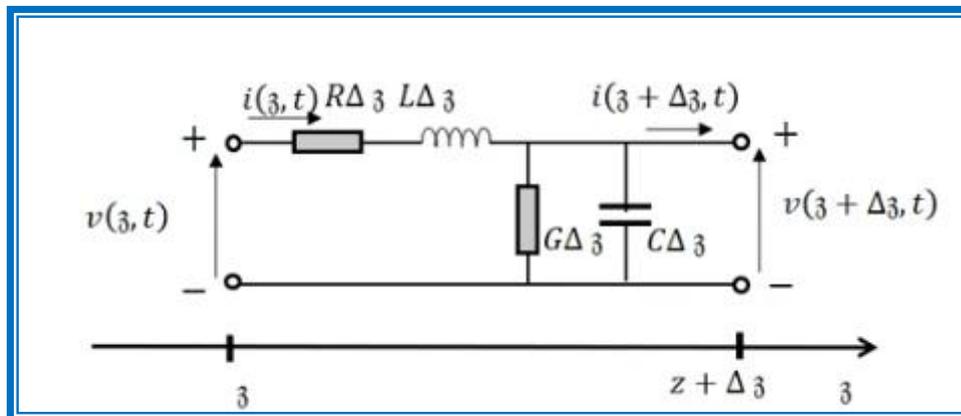
- $L$  : inductance en série [ $H/m$ ] ; représente la densité d'énergie magnétique stockée dans le milieu.
- $C$  : capacitance parallèle [ $F/m$ ] ; représente la densité d'énergie électrique stockée dans le milieu.
- $R$  : résistance en série [ $\Omega/m$ ] ; représente les pertes du conducteur.
- $G$  : conductance parallèle [ $S/m$ ] ; représente les pertes du diélectrique.

Les paramètres distribués ( $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$ ) sont liés aux propriétés physiques et dimensions géométriques des lignes de transmission comme suit :

Types de Lignes Paramètres	 <p>Coaxiales</p>	 <p>Bifilaires</p>	 <p>Plaques parallèles</p>
$L [H/m]$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$	$\frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{d}{2a}\right)$	$\frac{\mu d}{w}$
$C [F/m]$	$\frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$	$\frac{\pi\epsilon}{\cosh^{-1}\left(\frac{d}{2a}\right)}$	$\frac{\epsilon w}{d}$ ( $w \gg d$ )
$R [\Omega/m]$	$\frac{1}{2\pi\delta\sigma_c} \left[ \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right]$ ( $\delta \ll a, c - d$ )	$\frac{1}{\pi a \delta \sigma_c}$ ( $\delta \ll a$ )	$\frac{1}{w \delta \sigma_c}$ ( $\delta \ll a$ )
$G [S/m]$	$\frac{2\pi\sigma}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$	$\frac{\pi\sigma}{\cosh^{-1}\left(\frac{d}{2a}\right)}$	$\frac{\sigma w}{d}$

## 2.2. Equations de la ligne de transmission

En appliquant ‘la loi de tension’ de Kirchhoff sur cette section de la ligne de transmission, on obtient :



$$v(z, t) = R \Delta z i(z, t) + L \Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} + v(z + \Delta z, t)$$

- On récrit l'équation comme suit :

$$-\frac{v(z + \Delta z, t) - v(z, t)}{\Delta z} = R i(z, t) + L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t}$$

- En prenant la limite  $\Delta z \rightarrow 0$ , on obtient :

$$-\frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = R i(z, t) + L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \dots \dots (1)$$

- Ensuite, en appliquant ‘la loi de courant’ de Kirchhoff sur cette section, on obtient :

$$i(z, t) = G \Delta z v(z + \Delta z, t) + C \Delta z \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t} + i(z + \Delta z, t)$$

- On récrit l’équation précédente comme suit :

$$-\frac{i(z + \Delta z, t) - i(z, t)}{\Delta z} = G v(z + \Delta z, t) + C \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t}$$

- En prenant la limite  $\Delta z \rightarrow 0$ , on obtient :

$$-\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = G v(z, t) + C \frac{\partial v(z, t)}{\partial t} \dots \dots (2)$$

- La forme en phasor de l’équations des lignes de transmission est donnée par :

$$\begin{cases} -\frac{\partial V}{\partial z} = (R + j\omega L) I \dots (3) \\ -\frac{\partial I}{\partial z} = (G + j\omega C) V \dots (4) \end{cases}$$

Ou  $V(z)$  et  $I(z)$  sont respectivement les phasors de tension  $v(z, t)$  et de courant  $i(z, t)$ , avec :

$$v(z, t) = \text{Re}\{V(z) e^{j\omega t}\} \quad i(z, t) = \text{Re}\{I(z) e^{j\omega t}\}$$

- On applique la dérivée seconde sur les équations (3) et (4), on obtient :

$$\begin{cases} -\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = (R + j\omega L) \frac{\partial I}{\partial z} \dots (5) \\ -\frac{\partial^2 I}{\partial z^2} = (G + j\omega C) \frac{\partial V}{\partial z} \dots (6) \end{cases}$$

On remplace  $\frac{\partial I}{\partial z}$  et  $\frac{\partial V}{\partial z}$  sur le coté droit avec les équations (3) et (4), respectivement :

$$\begin{cases} -\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -(R + j\omega L)(G + j\omega C) V \\ -\frac{\partial^2 I}{\partial z^2} = -(G + j\omega C)(R + j\omega L) I \end{cases}$$

↓

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - (R + j\omega L)(G + j\omega C) V = 0 \dots (7) \\ \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} - (G + j\omega C)(R + j\omega L) I = 0 \dots (8) \end{cases}$$

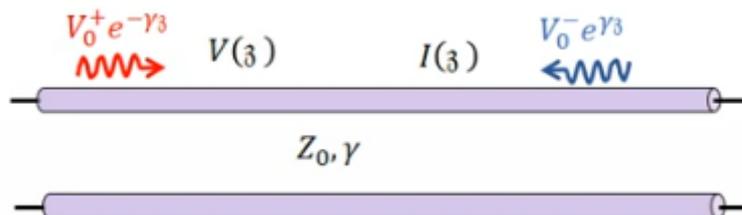
- On obtient les équations de Helmholtz pour  $V$  et  $I$  :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - \gamma^2 V = 0 \dots (9) \\ \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} - \gamma^2 I = 0 \dots (10) \end{cases}$$

- Avec  $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$  est la constante de propagation.
- $\beta$  est la constante de phase en  $[rad/m]$ .
- $\alpha$  est la constante d'atténuation en  $[Np/m]$ .
- $\lambda = 2\pi/\beta$  la longueur d'onde en  $[m]$ .
- $v_p = \omega/\beta$  la vitesse de phase en  $[m/s]$ .

Les solutions des équations différentielles homogènes linéaires précédentes eqs (9) et (10) sont données par :

$$\begin{cases} V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{+\gamma z} \dots (11) \\ I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{+\gamma z} \dots (12) \end{cases}$$



- $V_0^+ e^{-\gamma z}$  : onde qui se propage vers la charge (onde incidente).
- $V_0^- e^{+\gamma z}$  : onde qui se propage vers la source (onde réfléchie).

### 2.2.1 L'impédance caractéristique

❖ L'impédance caractéristique  $Z_0$  est analogue à  $\eta$ , l'impédance caractéristique du milieu de propagation des ondes plane. En remplaçant les équations (11) et (12) en eqs (3) et (4) et en égalisant les coefficients des termes  $e^{\gamma z}$  et  $e^{-\gamma z}$ , on obtient :

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = \frac{V_0^-}{I_0^-} = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \frac{\gamma}{G + j\omega C}$$

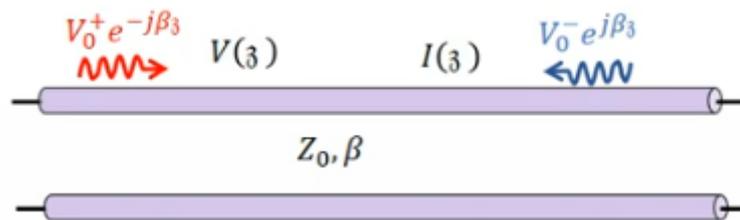
Donc :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = R_0 + jX_0$$

❖ La constante de propagation  $\gamma$  et l'impédance caractéristique  $Z_0$  sont des propriétés importantes de la ligne car toutes les deux dépendent des paramètres de la ligne R, L, G, et C et la fréquence de fonctionnement  $\omega$ .

### 2.2.2 Ligne sans perte

La ligne de transmission est dite sans perte si les conducteurs de la ligne sont parfaits ( $\sigma_c \rightarrow \infty$ ) et le milieu diélectrique qui les sépare est sans perte ( $\sigma \rightarrow 0$ ), dans ce cas :  $G = R = 0$ .



▪ La constante de propagation :

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = j\omega\sqrt{LC} \rightarrow \begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta = \omega\sqrt{LC} \end{cases}$$

▪ La vitesse de phase :  $v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

▪ L'impédance caractéristique :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

### 2.2.3 Ligne sans distorsion

Est une ligne dans laquelle la constante d'atténuation  $\alpha$  est indépendante de la fréquence. Tandis que la constante de phase  $\beta$  dépend linéairement de la fréquence. Une ligne est sans distorsion si les paramètres de ligne sont tels que :  $\frac{R}{L} = \frac{G}{C}$ .

✓ La constante de propagation :

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \rightarrow \gamma = \sqrt{RG(1 + j\omega L/R)(1 + j\omega C/G)}$$

$$\rightarrow \gamma = \sqrt{RG}(1 + j\omega C/G)$$

$$\rightarrow \gamma = \sqrt{RG} + j\omega\sqrt{LC}$$

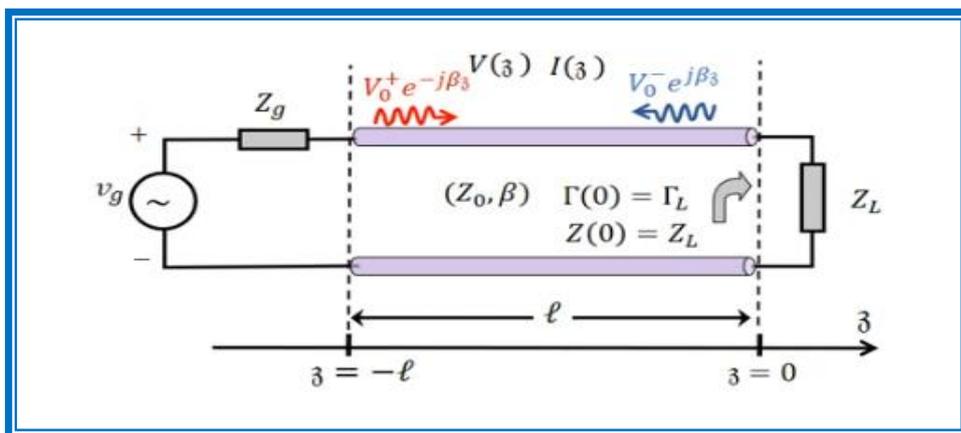
$$\rightarrow \begin{cases} \alpha = \sqrt{RG} \\ \beta = \omega\sqrt{LC} \end{cases}$$

✓ La vitesse de phase :  $v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

✓ L'impédance caractéristique :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{R(1 + j\omega L/R)}{G(1 + j\omega C/G)}} = \sqrt{\frac{R}{G}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

### 3.1. Coefficient de réflexion $\Gamma_L$ entre la ligne de transmission et la charge $Z_L$



- ❖ Soit une ligne de transmission sans perte de longueur  $\ell$ , caractérisée par  $\beta$  et  $Z_0$  connectée à une charge  $Z_L$ .
- ❖ Dans le système de coordonnées  $z$ , la tension totale sur la ligne  $V(z)$  est la somme de d'onde incidente  $V_0^+ e^{-j\beta z}$  et l'onde réfléchie  $V_0^- e^{j\beta z}$  :  $V(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z}$
- ❖ De même façon, le courant total sur la ligne  $I(z)$  est donné par :

$$I(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z} = I_0^+ e^{-j\beta z} + I_0^- e^{j\beta z}$$

❖ A la position de la charge ( $z = 0$ ), une partie de la puissance est renvoyée vers la source, le coefficient de réflexion est le rapport entre l'onde réfléchie et l'onde incident :  $\Gamma_L = \frac{V_0^-}{V_0^+}$

❖ A la position de la charge ( $z = 0$ ), la tension est  $V_L$  et le courant est  $I_L$  sont :

$$V_L = V(z = 0) = V_0^+ + V_0^-$$

$$I_L = I(z = 0) = \frac{V_0^+}{Z_0} - \frac{V_0^-}{Z_0}$$

❖ Ensuite nous avons :

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} = \frac{V_0^+ + V_0^-}{\frac{V_0^+}{Z_0} - \frac{V_0^-}{Z_0}} = Z_0 \frac{V_0^+ + V_0^-}{V_0^+ - V_0^-} = Z_0 \frac{V_0^+ \left(1 + \frac{V_0^-}{V_0^+}\right)}{V_0^+ \left(1 - \frac{V_0^-}{V_0^+}\right)} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L}$$

Donc :

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} \Rightarrow Z_L(1 - \Gamma_L) = Z_0(1 + \Gamma_L)$$

$$\Rightarrow Z_L - Z_L \Gamma_L = Z_0 + Z_0 \Gamma_L$$

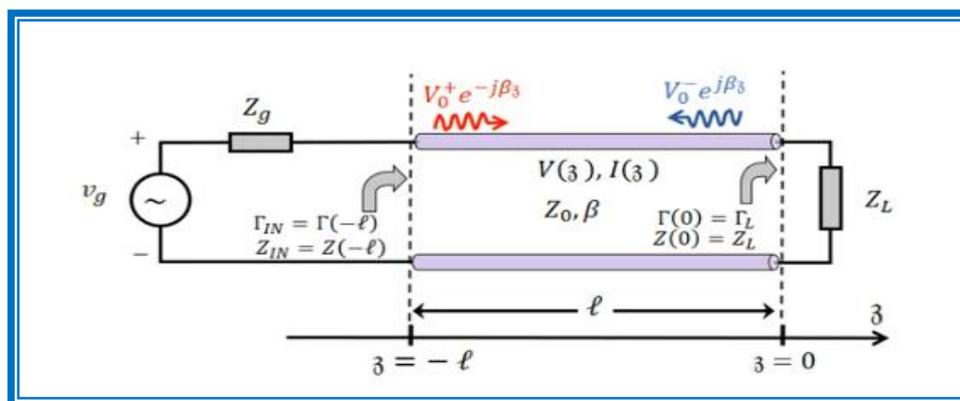
$$\Rightarrow Z_L - Z_0 = Z_L \Gamma_L + Z_0 \Gamma_L$$

$$\Rightarrow Z_L - Z_0 = \Gamma_L(Z_L + Z_0)$$

$$\Rightarrow \Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = |\Gamma_L| e^{j\theta}$$

$$\text{Donc } \begin{cases} 0 \leq |\Gamma_L| \leq 1 \\ 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{cases}$$

### 3.2. Coefficient de réflexion à l'entrée de la ligne de transmission $\Gamma_{IN}$



❖ On peut aussi définir le coefficient de réflexion en tout point  $z$  sur la ligne par :

$$\Gamma(z) = \frac{\text{Tension incidente au point } z}{\text{Tension réfléchie au point } z} = \frac{V_0^- e^{j\beta z}}{V_0^+ e^{-j\beta z}}$$

❖ A la position de la charge ( $z = -\ell$ ) :

$$\begin{aligned} \Gamma(z = -\ell) &= \frac{V_0^- e^{-j\beta\ell}}{V_0^+ e^{j\beta\ell}} \\ &= \frac{V_0^-}{V_0^+} e^{-j2\beta\ell} \\ &= \Gamma_L e^{-j2\beta\ell} \end{aligned}$$

❖ Donc, on obtient le coefficient de réflexion à l'entrée de la ligne de transmission :

$$\Gamma_{IN} = \Gamma(\ell) = \Gamma_L e^{-j2\beta\ell}$$

**Impédance d'entrée de la ligne de transmission**  $Z_{IN} = Z(-\ell)$  (Equation de la ligne de transmission).

❖ L'impédance varie le long de la ligne de transmission.

❖ A une distance  $\ell$  de la charge, cette impédance est donnée comme suit :

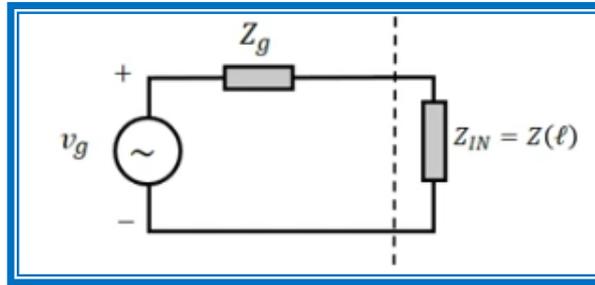
$$\begin{aligned} Z_{IN} = Z(-\ell) &= \frac{V(-\ell)}{I(-\ell)} \Rightarrow Z_{IN} = \frac{V_0^+ e^{j\beta\ell} + V_0^- e^{-j\beta\ell}}{\frac{V_0^+}{Z_0} e^{j\beta\ell} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{-j\beta\ell}} \\ &\Rightarrow Z_{IN} = Z_0 \frac{e^{j\beta\ell} + \frac{V_0^-}{V_0^+} e^{-j\beta\ell}}{e^{j\beta\ell} - \frac{V_0^-}{V_0^+} e^{-j\beta\ell}} \\ &\Rightarrow Z_{IN} = Z_0 \frac{e^{j\beta\ell} + \Gamma_L e^{-j\beta\ell}}{e^{j\beta\ell} - \Gamma_L e^{-j\beta\ell}} \end{aligned}$$

❖ On peut la transformer à une forme plus utile en substituant l'expression  $\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$

dans cette équation, on obtient :

$$\begin{aligned} Z_{IN} &= Z_0 \frac{e^{j\beta\ell} + \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-j\beta\ell}}{e^{j\beta\ell} - \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-j\beta\ell}} \\ &\Rightarrow Z_{IN} = Z_0 \frac{(Z_L + Z_0)e^{j\beta\ell} + (Z_L - Z_0)e^{-j\beta\ell}}{(Z_L + Z_0)e^{j\beta\ell} - (Z_L - Z_0)e^{-j\beta\ell}} \\ &\Rightarrow Z_{IN} = Z_0 \frac{Z_L(e^{j\beta\ell} + e^{-j\beta\ell}) + Z_0(e^{j\beta\ell} - e^{-j\beta\ell})}{Z_0(e^{j\beta\ell} + e^{-j\beta\ell}) - Z_L(e^{j\beta\ell} - e^{-j\beta\ell})} \\ &\Rightarrow Z_{IN} = Z_0 \frac{Z_L \cos(\beta\ell) + jZ_0 \sin(\beta\ell)}{Z_0 \cos(\beta\ell) - jZ_L \sin(\beta\ell)} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow Z_{IN} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta\ell)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta\ell)}$$



NB : ce résultat indique que la ligne de transmission transforme l'impédance de la charge  $Z_L$  à une nouvelle valeur  $Z_{IN}$ .

#### 4. Onde stationnaire « Standing wave »

❖ La tension sur la ligne de transmission est donnée par :

$$V(\ell) = V_0^+ (e^{j\beta\ell} + \Gamma_L e^{-j\beta\ell})$$

❖ En substituant l'expression  $\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = |\Gamma_L| e^{j\theta}$  dans l'expression précédente :

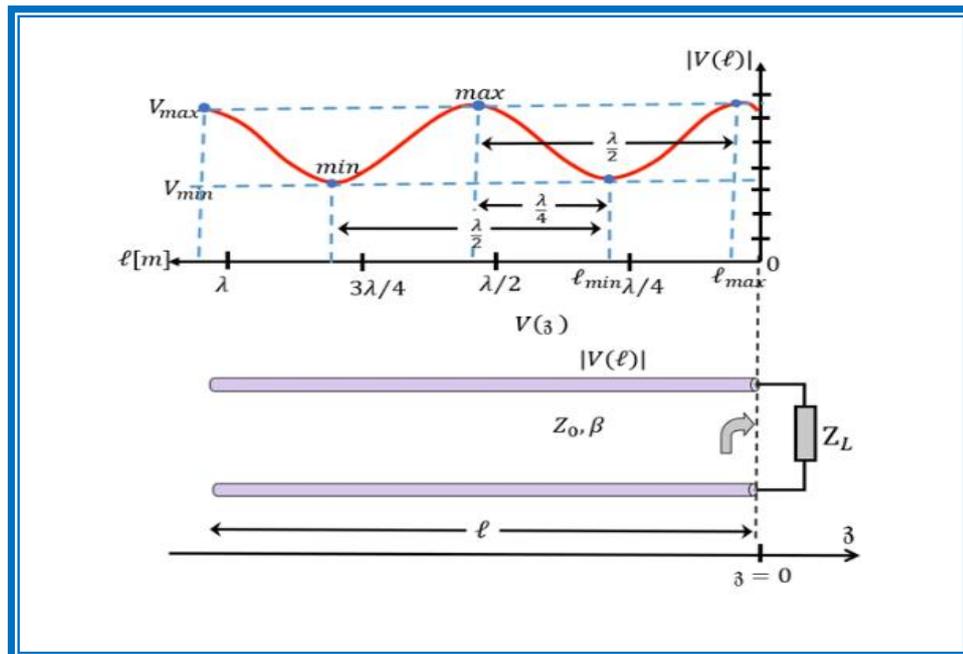
$$V(\ell) = V_0^+ (e^{j\beta\ell} + |\Gamma_L| e^{j\theta} e^{-j\beta\ell})$$

$$\Rightarrow |V(\ell)|^2 = \{V_0^+ (e^{j\beta\ell} + |\Gamma_L| e^{j\theta} e^{-j\beta\ell})\} \{V_0^{+*} (e^{j\beta\ell} + |\Gamma_L| e^{j\theta} e^{-j\beta\ell})\}^*$$

$$\Rightarrow |V(\ell)| = [\{V_0^+ (e^{j\beta\ell} + |\Gamma_L| e^{j\theta} e^{-j\beta\ell})\} \{V_0^{+*} (e^{j\beta\ell} + |\Gamma_L| e^{j\theta} e^{-j\beta\ell})\}]^{1/2}$$

$$\Rightarrow |V(\ell)| = [ |V_0^+|^2 (1 + |\Gamma_L|^2 + |\Gamma_L|^2 e^{j(\theta - 2\beta\ell)} + |\Gamma_L|^2 e^{-j(\theta - 2\beta\ell)}) ]^{1/2}$$

$$\Rightarrow |V(\ell)| = [ |V_0^+|^2 (1 + |\Gamma_L|^2 + 2|\Gamma_L| \cos(\theta - 2\beta\ell)) ]^{1/2}$$



- ❖ On tracer  $|V(\ell)| = [|V_0^+|^2(1 + |\Gamma_L|^2 + 2|\Gamma_L| \cos(\theta - 2\beta\ell))]^{1/2}$  en fonction de  $\ell$ , on obtient :
- ❖ Cette figure représente une « onde stationnaire », c.-à-d. la variation spatiale de  $|V(\ell)|$  en fonction de  $\ell$ .
- ❖ La période de répétition de l'onde stationnaire est  $\lambda/2$
- ❖ La valeur maximale  $V_{max}$  de l'onde stationnaire correspond à la position sur la ligne  $\ell_{max}$  à laquelle les ondes incidentes et réfléchies sont en phase  $\theta - 2\beta\ell = 2\pi n$
- ❖ La valeur minimale  $V_{min}$  de l'onde stationnaire correspond à la position sur la ligne  $\ell_{min}$  à laquelle les ondes incidentes et réfléchies sont en opposition de phase

$$\theta - 2\beta\ell = (2n + 1)\pi$$

#### 4.1 Rapport d'onde stationnaire « SWR »

- ❖ Le rapport d'onde stationnaire de tension (SWR) est défini comme le rapport entre le maximum de tension  $V_{max}$  et le minimum de tension  $V_{min}$  observé sur la ligne de transmission :

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{I_{max}}{I_{min}}$$

- ❖ La tension sur la ligne est donnée par :

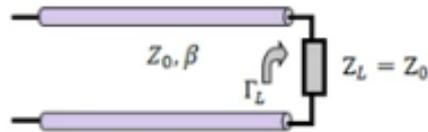
$$V(\ell) = V_0^+(e^{j\beta\ell} + \Gamma_L e^{-j\beta\ell}) \Rightarrow |V(\ell)| = |V_0^+| \cdot |1 + \Gamma_L e^{-2j\beta\ell}|$$

- ❖ On sait que  $\Gamma_L = |\Gamma_L|e^{j\theta}$ , donc  $|V(\ell)| = |V_0^+| \cdot |1 + |\Gamma_L|e^{j(\theta-2\beta\ell)}|$ 
  - La tension est maximale si :  $e^{j(\theta-2\beta\ell)} = 1$ , ce qui donne :  $V_{max} = |V_0^+|(1 + |\Gamma_L|)$
  - La tension est minimale si :  $e^{j(\theta-2\beta\ell)} = -1$ , ce qui donne :  $V_{min} = |V_0^+|(1 - |\Gamma_L|)$

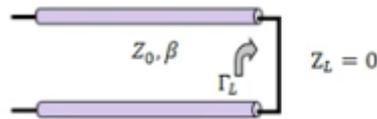
- ❖ Le rapport d'onde stationnaire « SWR » est donné par :

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \Rightarrow |\Gamma_L| = \frac{SWR - 1}{SWR + 1}$$

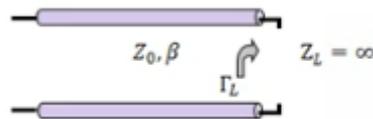
- Si la charge est adaptée à la ligne  $Z_L = Z_0 \Rightarrow \Gamma_L = 0$ , donc :  $SWR = 1$



- Si la charge est un court-circuit  $Z_L = 0 \Rightarrow \Gamma_L = -1$ , donc :  $SWR = \infty$



- Si la charge est un circuit ouvert  $Z_L = \infty \Rightarrow \Gamma_L = 1$ , donc :  $SWR = \infty$



## 4.2 Puissance portée par la ligne de transmission

- ❖ La ligne de transmission est utilisée pour transférer la puissance de la source à la charge.
- ❖ La puissance d'entrée moyenne à une distance  $\ell$  du la charge est donnée par :

$$\begin{aligned}
 P_{an} &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{V(\ell) \cdot I^*(\ell)\} \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}\left\{V_0^+ (e^{j\beta\ell} + \Gamma_L e^{-j\beta\ell}) \cdot \frac{V_0^{+*}}{Z_0} (e^{-j\beta\ell} - \Gamma_L^* e^{j\beta\ell})\right\} \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{(1 - |\Gamma_L|^2 + \Gamma_L e^{-2j\beta\ell} - \Gamma_L^* e^{2j\beta\ell})\}
 \end{aligned}$$

- ❖ Puisque les deux derniers termes  $\Gamma_L e^{-2j\beta\ell} - \Gamma_L^* e^{2j\beta\ell}$  ensemble deviennent purement imaginaires, nous avons :

$$P_{an} = \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} (1 - |\Gamma_L|^2)$$

- ❖ On peut écrire l'équation sous la forme suivante :  $P_{an} = \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} - |\Gamma_L|^2 \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} = P_i - P_r$
- ❖ La puissance totale délivrée à la charge est la puissance incidente  $P_i$  moins la puissance réfléchie  $P_r$ .
- ❖ Les pertes d'adaptation (ou return loss) RL : c'est la puissance par réflexion

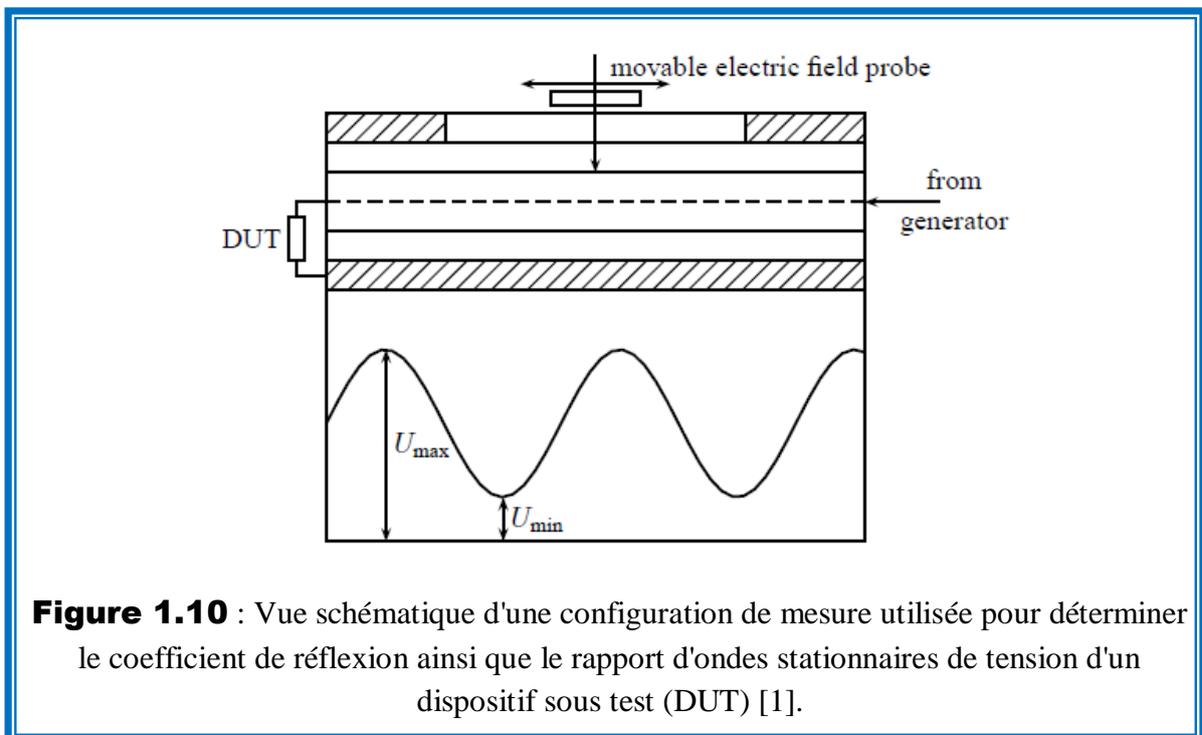
$$RL = |\Gamma_L|^2 RL_{dB} = -10 \log|\Gamma_L|^2 \quad [dB]$$

- ❖ Les pertes de désadaptation (ou mismatchloss)  $ML$  : c'est la puissance additionnelle qui serait fournie à la charge si la charge était adaptée.

$$ML = 1 - |\Gamma_L|^2 R_{L_{dB}} = -10 \log(1 - |\Gamma_L|^2)$$

## 5. Motivation (Diagramme de Smith)

Grâce aux équipements actuels, mesurer le facteur de réflexion  $\Gamma$  est devenu relativement simple, même pour des réseaux complexes. En revanche, dans le passé, cette mesure se faisait en enregistrant l'intensité du champ électrique sur une ligne de mesure coaxiale, avec une fente placée à différentes positions le long de l'axe (Fig. 1).



**Figure 1.10** : Vue schématique d'une configuration de mesure utilisée pour déterminer le coefficient de réflexion ainsi que le rapport d'ondes stationnaires de tension d'un dispositif sous test (DUT) [1].

Une petite sonde de champ électrique, placée dans la zone de champ de la ligne coaxiale près du conducteur extérieur, était déplacée le long de la ligne. Son signal était capté puis affiché sur un microvoltmètre après redressement à l'aide d'une diode hyperfréquence. En déplaçant la sonde, il était possible de repérer les maxima et minima du champ, ainsi que de déterminer leur position et leur espacement. À partir de ces mesures, le facteur de réflexion  $\Gamma$  et le rapport d'ondes stationnaires de tension (VSWR ou SWR) pouvaient être calculés à partir des définitions suivantes :

- $\Gamma$  est défini comme le rapport de l'intensité du champ électrique  $E$  de l'onde réfléchie sur celle de l'onde directe ou progressive.

$$\Gamma = \frac{E \text{ de l'onde réfléchie}}{E \text{ de l'onde progressive vers l'avant}} \quad (1)$$

Le VSWR est défini comme le rapport entre la tension mesurée maximale et minimale :

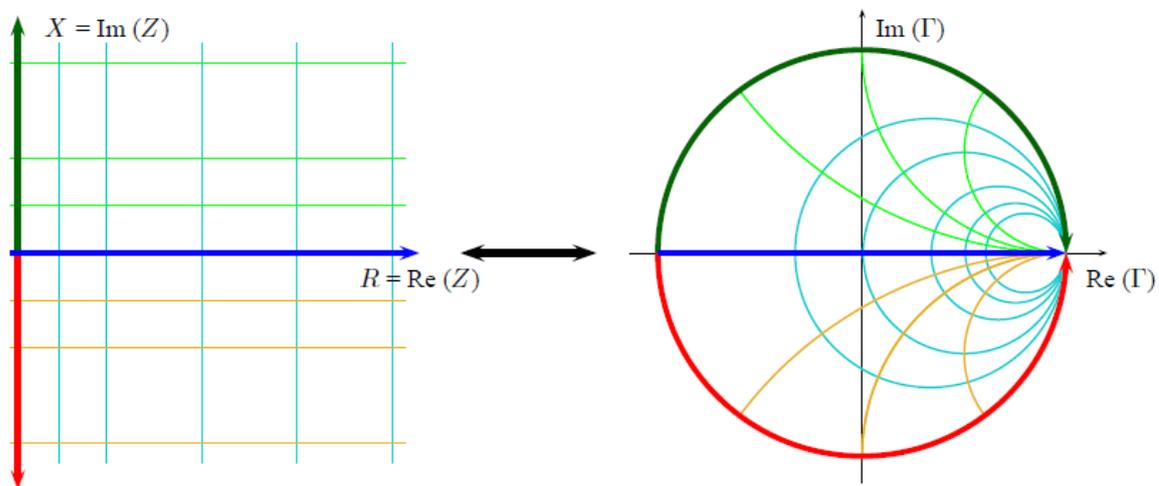
$$VSWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2)$$

## 5.1 Définition du diagramme de Smith

Le **diagramme de Smith** offre une représentation graphique du facteur de réflexion  $\Gamma$ , facilitant ainsi la détermination de paramètres tels que le **VSWR** ou l'impédance de terminaison d'un appareil sous test (DUT). Il repose sur une transformation bilinéaire de Möbius, qui projette le plan d'impédance complexe sur le plan complexe de  $\Gamma$  :

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \text{ avec } Z = R + jX \quad (3)$$

Comme le montre la figure 2, le demi-plan correspondant à une partie réelle positive de l'impédance  $Z$  est mappé à l'intérieur du cercle unitaire du plan  $\Gamma$ . Pour un calcul plus détaillé, se référer à l'annexe A.

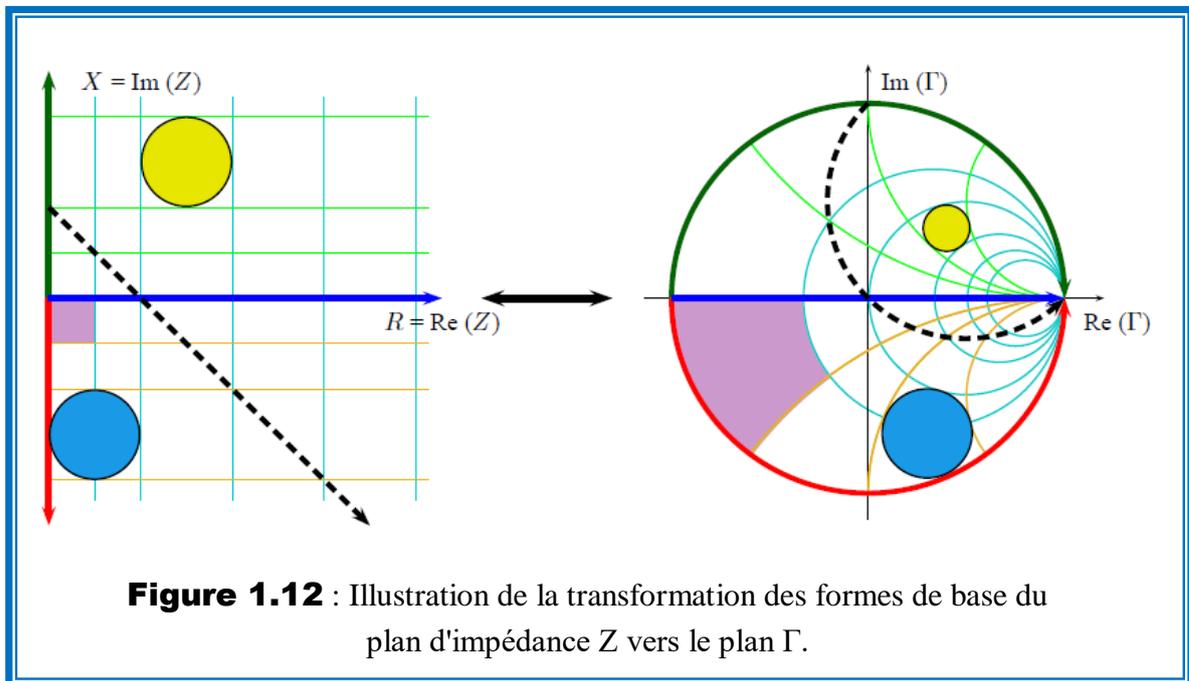


**Figure. 1.11** : Illustration de la transformée de Moebius du plan d'impédance complexe au plan  $\Gamma$  communément appelé diagramme de Smith.

## 5.2 Propriétés de la transformation

En général, cette transformation possède deux propriétés principales : – Les cercles généralisés sont mappés sur des cercles généralisés (il convient de noter qu'une ligne droite peut être considérée comme un cercle de rayon infini et est donc représentée sous forme de

cercle dans le diagramme de Smith). – Les angles sont conservés localement. La figure 3 montre comment certaines formes de base se transforment de l'impédance vers le plan  $\Gamma$ .



### 5.2.1 Normalisation

Le diagramme de Smith est généralement normalisé à une impédance de terminaison  $Z_0$  (réelle).

$$z = \frac{Z}{Z_0} \quad (4)$$

Cela conduit à une simplification de la transformation,

$$\Gamma = \frac{z - 1}{z + 1} \Leftrightarrow z = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (5)$$

Bien que l'impédance de référence la plus courante soit  $Z = 50$  (impédance caractéristique des câbles coaxiaux) et que de nombreuses applications utilisent cette normalisation, il existe d'autres valeurs réelles et positives possibles. Il est donc essentiel de vérifier la normalisation avant d'utiliser un graphique. Les graphiques fréquemment utilisés pour mapper le plan d'impédance sur le plan  $\Gamma$  peuvent sembler déroutants au premier abord. Cependant, il est important de se rappeler que tous peuvent être calculés comme indiqué dans l'annexe A, et que cette représentation est identique à celle des figures précédentes, à l'exception du fait qu'elle contient simplement plus de cercles.

## 5.2. Plan d'admittance

La transformée de Moebius qui génère le diagramme de Smith fournit également une cartographie du plan d'admittance complexe ( $Y = 1/Z$  ou  $y$  normalisé  $y = 1/z$ ) dans le même diagramme :

$$\Gamma = -\frac{y-1}{y+1} = -\frac{Y-Y_0}{Y+Y_0} = -\frac{1/Z-1/Z_0}{1/Z+1/Z_0} = \frac{Z-Z_0}{Z+Z_0} = \frac{z-1}{z+1} \quad (6)$$

### 5.2.1. Navigation dans le diagramme de Smith

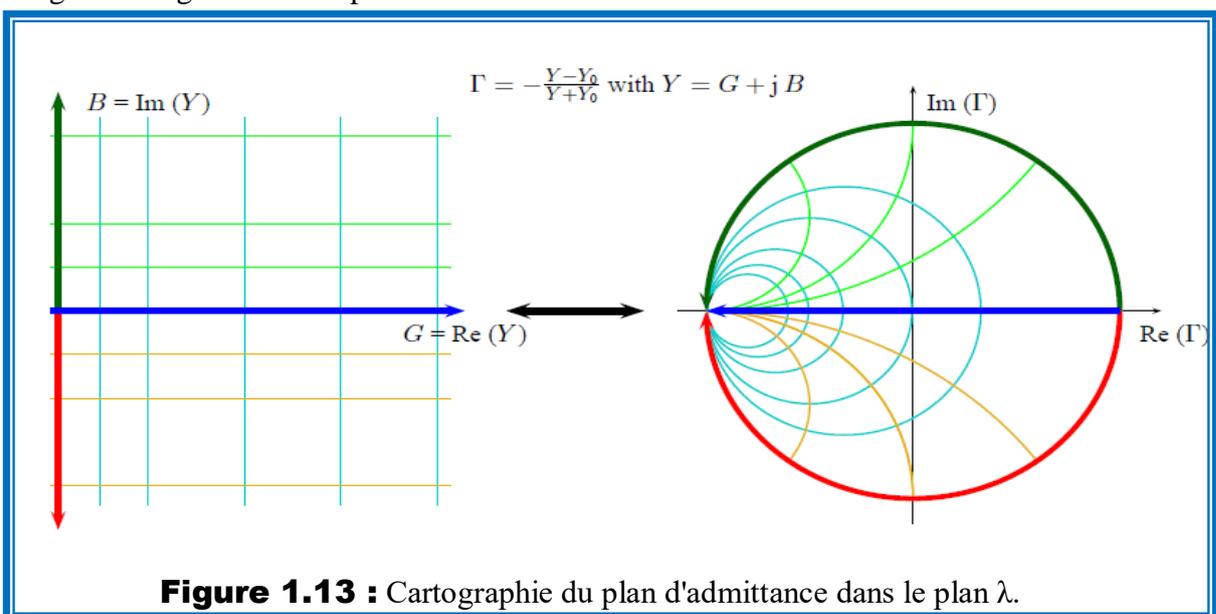
Ce chapitre aborde la représentation des éléments de circuit dans le diagramme de Smith, en commençant par les points clés à l'intérieur du diagramme. Par la suite, plusieurs exemples d'éléments de circuit seront présentés, accompagnés de leurs représentations dans le diagramme.

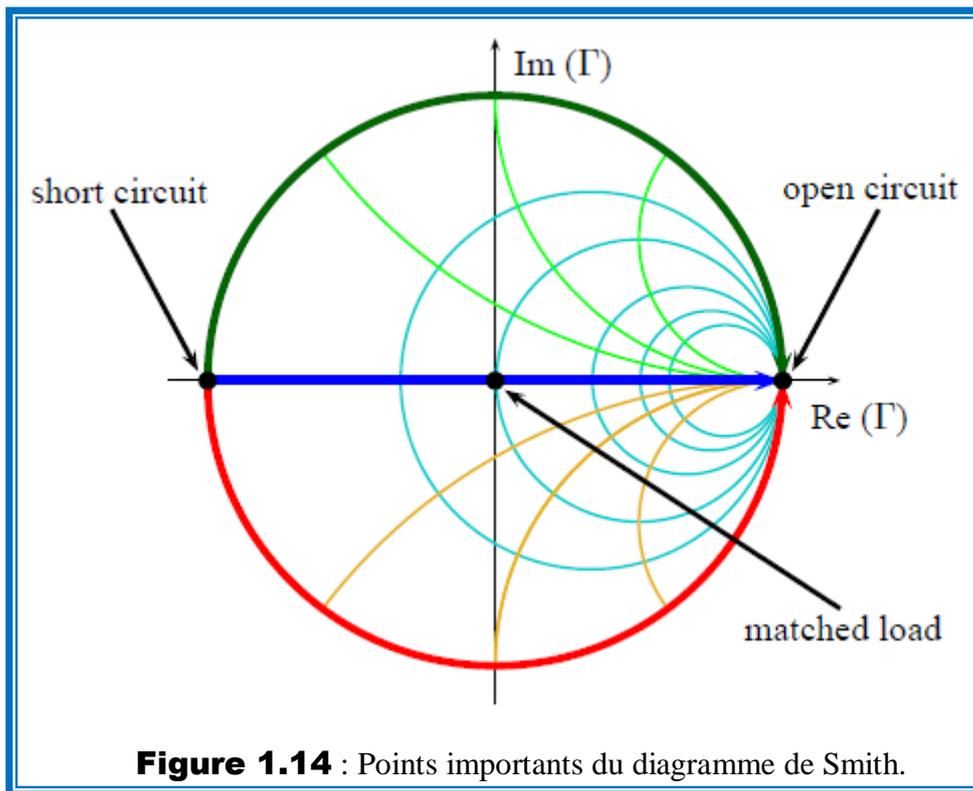
#### A. Points importants

Il y a trois points importants dans le tableau :

1. Circuit ouvert avec  $\Gamma = 1, z \rightarrow \infty$
2. Court-circuit avec  $\Gamma = -1, z = 0$
3. Charge adaptée avec  $\Gamma = 0, z = 1$

Ils sont tous situés sur l'axe réel, au début, à la fin et au centre du cercle. La moitié supérieure du graphique est inductive, représentant la partie imaginaire positive de l'impédance, tandis que la moitié inférieure est capacitive, correspondant à la partie imaginaire négative de l'impédance.





## 6. Transformation d'impédance par ligne de transmission

La matrice S d'une ligne de transmission idéale et sans perte de longueur  $l$  est donnée par :

$$S = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\beta l} \\ e^{-j\beta l} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Lorsqu'un segment de ligne coaxiale est ajouté, cela provoque une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre sur le cercle correspondant, ce qui entraîne une transformation du facteur de réflexion de charge  $\Gamma_{charge}$  (sans ligne) vers le nouveau facteur de réflexion  $\Gamma_{in} = \Gamma_{charge} e^{-j2\beta l}$ . Graphiquement, cela signifie que le vecteur correspondant à  $\Gamma_{in}$  est tourné dans le sens des aiguilles d'une montre d'un angle de  $2\beta l$ . Une caractéristique importante d'une ligne de transmission est qu'elle peut se comporter comme une inductance, un condensateur ou une résistance en fonction de sa longueur. L'impédance de cette ligne (si elle est sans perte !) est donnée par :

$$Z_{in} = jZ_0 \tan(\beta l) \quad (8)$$

La fonction dans l'équation (10) a un pôle à une longueur de ligne de transmission de  $\lambda/4$  (Fig. 6). Par conséquent, l'ajout d'un

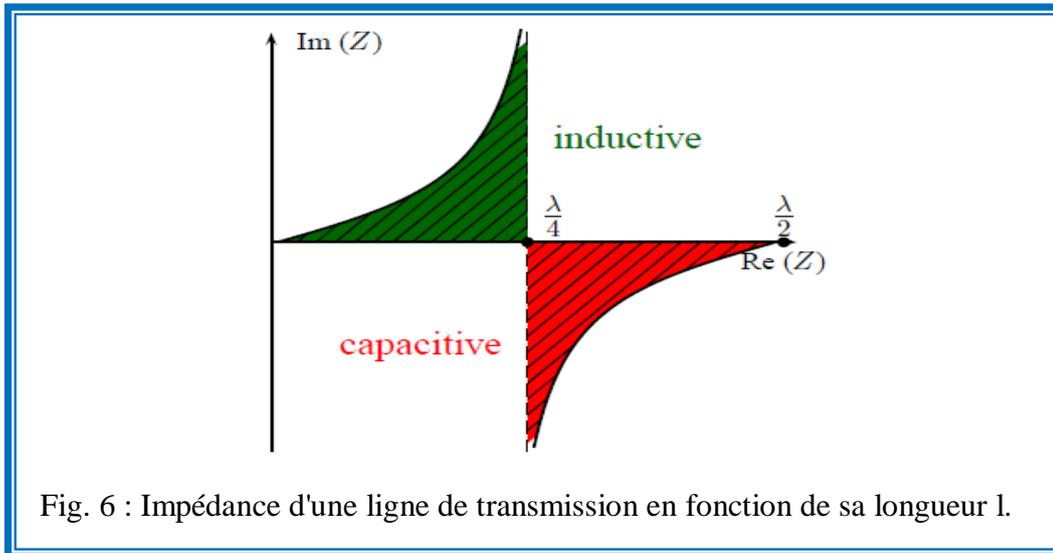


Fig. 6 : Impédance d'une ligne de transmission en fonction de sa longueur l.

ligne de transmission avec cette longueur entraîne un changement de  $\Gamma$  d'un facteur  $-1$  :

$$\Gamma_{in} = \Gamma_{charge} e^{-j2\beta l} = \Gamma_{charge} e^{-j2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)l} = \Gamma_{charge} e^{-j\pi} = -\Gamma_{charge} \quad \text{avec } l = \frac{\lambda}{4} \quad (9)$$

Encore une fois, cela équivaut à changer l'impédance d'origine  $z$  en son admittance  $1/z$  ou le mouvement dans le sens des aiguilles d'une montre du vecteur d'impédance de  $180^\circ$ . Surtout lors d'un démarrage avec un court-circuit (à  $-1$  dans le graphique de Smith), l'ajout d'une ligne de transmission de longueur  $\lambda/4$  la transforme en circuit ouvert (à  $+1$  dans le Smith graphique).

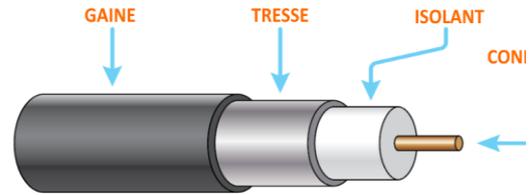
## 6.1. Avantages du diagramme de Smith

### - Un Résumé

- Le diagramme offre une représentation compacte et pratique de toutes les impédances passives de  $0$  à  $\infty$ . Les impédances avec une partie réelle négative telles qu'un amplificateur à réflexion ou tout autre dispositif actif apparaître en dehors du graphique de Smith.
- La discordance d'impédance est facilement repérable dans le graphique.
- Puisque le mappage convertit les impédances ou les admittances ( $y = 1/z$ ) en facteurs de réflexion et vice inversement, il est particulièrement intéressant pour les études dans le domaine des radiofréquences et des micro-ondes. Pour des raisons de commodité, les grandeurs électriques sont généralement exprimées en termes d'ondes directes ou directes

et des ondes réfléchies ou inverses dans ces gammes de fréquences au lieu des tensions et courants utilisés à des fréquences plus basses.

# 2



## Conducteurs Electriques

### Dans ce chapitre

---

- ↪ Coaxiaux, paires torsadées, normes et catégories
  - ↪ paires torsadées
  - ↪ normes et catégories
-

## Conducteurs électriques

### 2.1. Introduction

Les conducteurs électriques, essentiels pour la transmission de courant et de signaux, varient selon leur structure et leurs applications. Les conducteurs coaxiaux sont composés de deux conducteurs concentriques, avec un conducteur central, un isolant, et un conducteur externe servant à protéger le signal des interférences électromagnétiques, et sont couramment utilisés pour les systèmes de télévision par câble et les réseaux haute fréquence. Les paires torsadées, formées de deux fils isolés enroulés l'un autour de l'autre, sont largement utilisées dans les lignes téléphoniques et les réseaux informatiques, offrant une meilleure résistance aux interférences grâce à leur structure. Ces différents types de conducteurs, chacun ayant des caractéristiques uniques en termes de capacité de transmission, de protection contre les perturbations et de bande passante, sont choisis en fonction des exigences spécifiques de chaque application.

#### Les principaux types de supports de transmission :

On distingue trois grandes familles de supports de transmission:

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

### 2.2. Les types de supports de télécommunication

Pour établir la connexion entre un émetteur et un récepteur, ou pour interconnecter les différents composants d'un réseau de télécommunication, divers supports métalliques de transmission de données peuvent être employés. Parmi ces options, l'utilisation de câbles constitue l'une des solutions les plus courantes. Il existe une large variété de câbles, mais certains types se distinguent particulièrement, notamment :

- ✓ Le câble coaxial ;
- ✓ Les fibres optiques ;
- ✓ Ligne à paire torsadée.

### 2.3. Câble coaxial

Grâce à son coût abordable et à sa facilité de manipulation, notamment en termes de poids et de flexibilité, le câble coaxial (coaxial cable en anglais) a longtemps été l'un des types de câblage les plus répandus. Comme le montre la figure ci-dessous, un câble coaxial se compose d'un conducteur central en cuivre, appelé « âme », entouré d'un matériau diélectrique (isolant). Ce dernier est ensuite protégé par une tresse métallique servant de blindage, avant d'être recouvert d'une gaine extérieure pour assurer une protection supplémentaire contre les interférences et les dommages mécaniques.

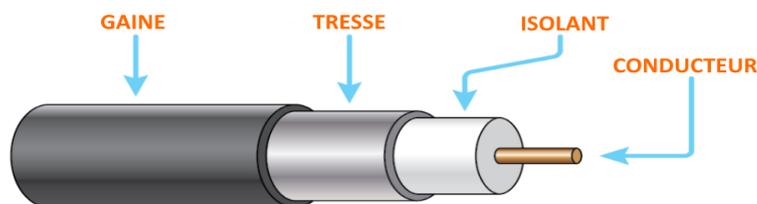


Figure 2.1 : Câble coaxial.

L'âme est un instrument responsable du transport des données, est généralement constituée d'un seul fil de cuivre ou de plusieurs brins torsadés. L'isolant c'est le matériau qui entoure l'âme, est fabriqué à partir d'un matériau diélectrique conçu pour éviter tout contact entre l'âme et la tresse : ce qui pourrait entraîner un court-circuit. La tresse servant de conducteur de retour, est composée de brins de cuivre tressés. Le blindage est une enveloppe métallique entourant le câble, protège les données transmises des interférences externes susceptibles de perturber le signal. Enfin, la gaine extérieure qui souvent en caoutchouc, PVC ou téflon, assure la protection physique du câble contre les conditions environnementales.

- ❖ Les fuites par radiations sont énormément réduites.
- ❖ Le câble coaxial est utilisé pour des fréquences allant jusqu'à 1 GHz.
- ❖ Il existe deux standards d'impédance caractéristique :  $50\Omega$  et  $75\Omega$ .

Le câble coaxial est énormément utilisé en télécommunication. Vous avez sûrement reconnu que c'est un câble coaxial qui relie votre antenne parabolique à votre démo TV.

## 2.4. Les avantages et inconvénients des supports physiques de transmission des câbles coaxiales:

### A. Les avantages :

- ✚ Caractéristiques intéressantes et immunité aux bruits électromagnétiques.
- ✚ Transport de données numériques 50 Ohms et analogiques de 75 Ohms.

### B. Les inconvénients :

- ✚ Difficulté d'installation et manque d'adaptation face aux modifications.
- ✚ Le coût reste plus élevé que celui de la paire torsadée pour des préférences.

## 2.5. Types de câbles coaxiaux

Grâce à son blindage, le câble coaxial est particulièrement adapté à la transmission de données sur de longues distances et à des vitesses élevées. Il existe des versions de câbles coaxiaux avec des niveaux de protection variés, comme des câbles à double blindage (composés d'une couche isolante et d'une couche de blindage) ou à quadruple blindage (deux couches isolantes et deux couches de blindage). Les normes Ethernet sont généralement exprimées sous la forme « x » modulation « y » :

- « x » représente la vitesse de transmission en Mb/s,
- « y » indique le type de support de transmission :
- « T » pour les câbles à paires torsadées,
- Un chiffre pour spécifier le type de câble coaxial :
- « 2 » pour les câbles coaxiaux fins,
- « 5 » pour les câbles coaxiaux plus épais,
- « FL » ou « FO » pour les câbles en fibre optique.

Les normes IEEE fournissent les spécifications techniques pour la mise en œuvre de différents types de réseaux Ethernet.

La norme IEEE 802.3 pour les câbles coaxiaux:

- Le 10Base2 pour les câbles en coaxial fin ;

- Le 10Base5 (ETHERNET STANDARD) pour les câbles en coaxial épais
- Le 100BaseX (FAST ETHERNET)

## 2.6. Câble coaxiale 10 base 2 :

Le câble 10Base2, également connu sous les noms de Thinnet, réseau fin ou CheaperNet (réseau économique), est un câble coaxial de petit diamètre, mesurant environ 6 mm. Très flexible, il est couramment utilisé dans divers types de réseaux, en étant directement connecté à la carte réseau. Ce câble permet de transmettre un signal sur une distance d'environ 185 mètres sans subir de perte significative de signal.



Figure 2.2 : Câble coaxial de type 10Base2.

## 2.7. Câble 10 Base 5 :

Le 10Base5, également appelé Thicknet ou Thick Ethernet, et parfois surnommé Yellow Cable en raison de sa couleur jaune distinctive, est un câble coaxial épais. Il possède un diamètre plus important, d'environ 12 mm, et une impédance caractéristique de 50 ohms. Ce câble est blindé, ce qui lui permet de résister mieux aux interférences électromagnétiques et de maintenir une transmission fiable sur de plus longues distances par rapport à d'autres types de câbles coaxiaux.



Figure 2.3 : Câble coaxial épais de type 10Base5.

## 2.8. Le 100 Base X (FAST ETHERNET)

Le 100BaseX, également connu sous le nom de Fast Ethernet, est une norme de réseau Ethernet permettant une vitesse de transmission de 100 mégabits par seconde (Mbps). Cette norme est une évolution de l'Ethernet traditionnel (10BaseT) et a été développée pour offrir des vitesses de transfert plus rapides, adaptées aux besoins croissants des réseaux modernes.

Le 100BaseX est un terme générique qui englobe plusieurs variantes de transmission, notamment :

1. 100Base-TX : La version la plus courante, qui utilise des câbles à paires torsadées pour les connexions. Elle peut atteindre des distances allant jusqu'à 100 mètres.
2. 100Base-FX : Une variante qui utilise des fibres optiques pour la transmission, permettant des distances beaucoup plus longues (jusqu'à 2 km ou plus, selon le type de fibre).
3. 100Base-T4 : Une version moins courante qui utilise quatre paires de fils pour offrir une transmission à 100 Mbps sur des câbles à paires torsadées non blindées (UTP), mais avec des limitations sur les distances et la qualité du câble.

Le Fast Ethernet a largement remplacé l'ancienne norme 10Base-T (Ethernet à 10 Mbps), offrant une vitesse de transmission plus rapide, tout en restant compatible avec les équipements Ethernet existants. Cependant, avec l'évolution des technologies, il est progressivement remplacé par des normes plus rapides, comme Gigabit Ethernet (1000Base-T).



Figure 2.4 : Câble faste Ethernet.

## 2.9. La paire torsadée

Un câble à paire torsadée est un type de câble composé de deux fils conducteurs en cuivre, enroulés l'un autour de l'autre de manière hélicoïdale (torsadée). Cette configuration permet de réduire les interférences électromagnétiques externes, car les champs électromagnétiques générés par les courants qui circulent dans les fils s'annulent partiellement.



Figure 2.5 : Paire torsadée.

## 2.10. Types de paires torsadées :

Les câbles à paire torsadée sont couramment utilisés pour les connexions Ethernet. Il existe deux principaux types de câbles à paire torsadée :

**a. Câble UTP (Unshielded Twisted Pair) :** Il s'agit d'un câble sans blindage, où seules les paires torsadées sont utilisées pour protéger les données contre les interférences. Ce type est souvent utilisé pour des applications de faible à moyenne distance, comme dans les réseaux locaux (LAN).

**b. Câble STP (Shielded Twisted Pair) :** Ce câble inclut un blindage supplémentaire (souvent métallique) autour des paires torsadées, offrant une protection renforcée contre les interférences électromagnétiques, ce qui le rend adapté aux environnements bruyants électriquement.

Les câbles à paire torsadée sont utilisés dans une large gamme d'applications, telles que la transmission de données Ethernet, les lignes téléphoniques et d'autres systèmes de communication, en raison de leur coût relativement faible, de leur flexibilité et de leur capacité à fournir des vitesses de transmission élevées sur des distances modérées.



Figure 2.6 : paire torsadée non blindé (UTP).

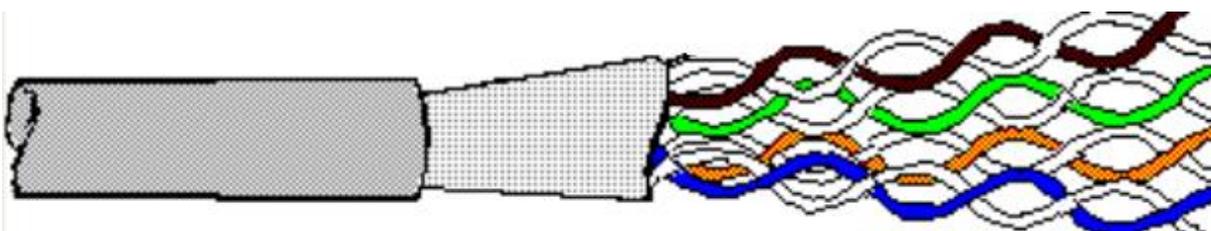


Figure 2.7 : paire torsadée blindé (STP).

## 2.11. Les types de blindages:

Pour réduire les interférences électromagnétiques, les paires torsadées sont fréquemment équipées de différents types de blindage. Bien que le blindage agisse comme une protection, en tant que conducteur, il peut également jouer un rôle de référentiel de masse, ce qui peut occasionner des problèmes d'interférences à basse fréquence, notamment si le système de masses de l'alimentation électrique est défaillant. Le blindage peut être appliqué individuellement sur chaque paire ou à l'ensemble des paires torsadées. Lorsqu'il est appliqué à l'ensemble des paires, on parle d'écrantage. En fonction du type de blindage, on distingue plusieurs catégories de câbles à paire torsadée :

- Paire torsadée non blindée (UTP) : Aucune protection contre les interférences n'est appliquée. Cette configuration est la plus courante dans les installations standard.
- Paire torsadée écrantée (FTP) : Un blindage global, sous forme de feuille d'aluminium, enveloppe l'ensemble des paires torsadées, protégeant ainsi le câble des interférences extérieures. Les paires individuelles ne sont pas protégées.
- Paire torsadée blindée (STP) : Chaque paire torsadée est entourée d'un blindage en aluminium, similaire à celui utilisé dans les câbles coaxiaux, offrant ainsi une meilleure isolation contre les interférences.
- Paire torsadée doublement écrantée (FFTP) : Chaque paire est protégée par une feuille d'aluminium, et l'ensemble des paires est également enveloppé d'une feuille de blindage en aluminium, offrant une protection renforcée.
- Paire torsadée écrantée et blindée (SFTP) : Ce type de câble bénéficie d'un double blindage (une feuille métallique et une tresse), appliqué à l'ensemble des paires, sans que chaque paire ne soit protégée individuellement.
- Paire torsadée super blindée (SSTP) : Chaque paire est enveloppée d'un blindage en aluminium, et la gaine extérieure est également protégée par une tresse métallique en cuivre étamé, offrant ainsi une isolation maximale contre les interférences.

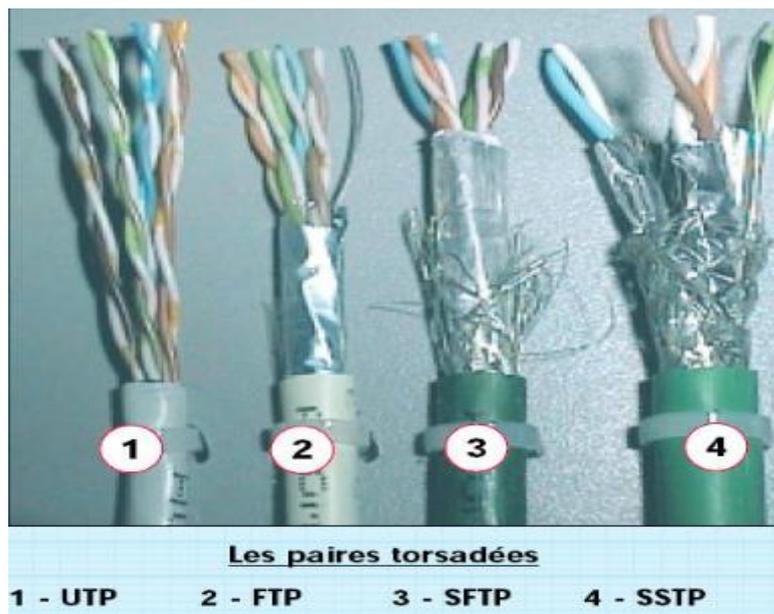


Figure 2. 8 : types des paires torsadées.

Le tableau suivant résume la dénomination courante de câbles de transmission torsadés :

Usage courant	ISO 11801	Blindage du câble	Blindage de paire
UTP	U/UTP	aucun	aucun
STP	S/UTP	tresse	aucun
FTP, STP	F/UTP	feuillard	aucun
SFTP, S-FTP, STP	SF/UTP	tresse, feuillard	aucun
STP	U/FTP	aucun	feuillard
SSTP, SFTP, STP	S/FTP	tresse	feuillard
FFTP, STP	F/FTP	feuillard	feuillard
SSTP, SFTP, STP	SF/FTP	tresse, feuillard	feuillard

### 2.12. Catégories des câbles torsadés :

Les câbles à paires torsadées sont classés en différentes catégories, en fonction de leurs performances et de leur capacité à résister aux interférences électromagnétiques. Voici les principales catégories des câbles à paires torsadées :

**1. Catégorie 1 (Cat 1) :** Utilisée pour les lignes téléphoniques analogiques. Elle ne permet pas une transmission de données à haut débit et est principalement utilisée pour les communications vocales.

**2. Catégorie 2 (Cat 2) :** Principalement utilisée pour les réseaux locaux à faible débit, comme dans les anciennes installations de réseaux téléphoniques.

**3. Catégorie 3 (Cat 3) :** Utilisée pour des vitesses allant jusqu'à 10 Mbps. Elle est souvent utilisée dans les anciennes installations de réseaux Ethernet à 10Base-T.

**4. Catégorie 4 (Cat 4) :** Permet des vitesses de transmission allant jusqu'à 16 Mbps. Moins courante aujourd'hui, elle était utilisée dans les réseaux locaux plus anciens.

**5. Catégorie 5 (Cat 5) :** Cette catégorie était largement utilisée pour les réseaux Ethernet 10Base-T et 100Base-TX (100 Mbps). Cependant, elle a été largement remplacée par la Cat 5e.

**6. Catégorie 5e (Cat 5e) :** Amélioration de la Cat 5, permettant des vitesses allant jusqu'à 1 Gbps (Gigabit Ethernet). C'est l'une des catégories les plus courantes pour les réseaux domestiques et les réseaux d'entreprise.

**7. Catégorie 6 (Cat 6) :** Câble capable de supporter des vitesses de transmission jusqu'à 10 Gbps sur des distances réduites (jusqu'à 55 mètres). Utilisé pour des réseaux Ethernet à haut débit.

**8. Catégorie 6a (Cat 6a) :** Version améliorée de la Cat 6, permettant une transmission de 10 Gbps sur des distances allant jusqu'à 100 mètres. Elle offre une meilleure protection contre les interférences électromagnétiques.

**9. Catégorie 7 (Cat 7) :** Câble blindé offrant une transmission jusqu'à 10 Gbps sur des distances allant jusqu'à 100 mètres. Il est conçu pour des environnements nécessitant une isolation élevée contre les interférences.

**10. Catégorie 8 (Cat 8) :** Destinée aux applications de centres de données et de très hautes performances, elle supporte des vitesses allant jusqu'à 40 Gbps sur des distances de 30 mètres maximum.

Ces catégories sont définies en fonction des spécifications de transmission de données et de la résistance aux interférences. La catégorie la plus haute permet des transmissions plus rapides et sur de plus longues distances, avec une meilleure protection contre les bruits et les interférences.

### 2.13. Les connecteurs :

La paire torsadée se branche à la carte réseau à l'aide d'un connecteur RJ45. Le connecteur RJ45 (Registered Jack) qui est le plus couramment utilisé en terminaison d'un câble à paires torsadées. On le retrouve également en téléphonie. Il comporte 8 broches de connexion électrique.



Figure 2.9 :Connecteur RJ45.

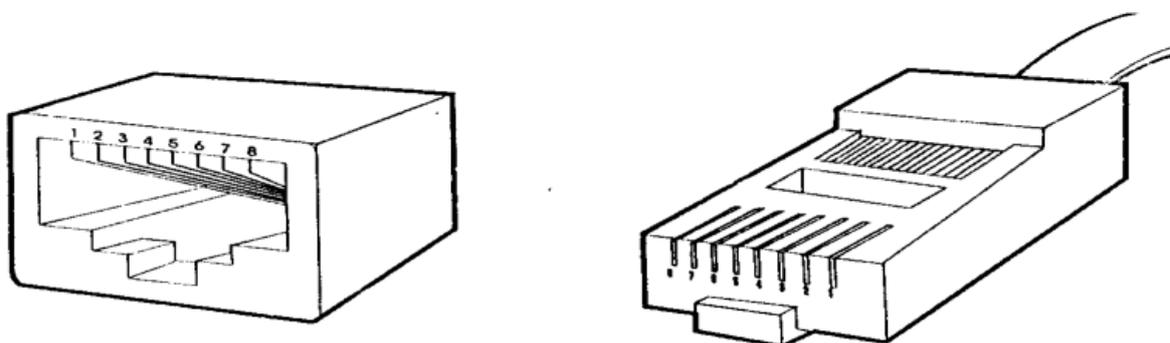


Figure 2.10 : Topologie du connecteur RJ45.

## 2.14. Comparaison entre les Câbles Coaxiaux et les Câbles à Paires Torsadées :

### Structure :

Les **câbles coaxiaux** sont composés d'un fil central entouré d'un isolant, suivi d'une couche de blindage et d'une gaine extérieure.

Les **câbles à paires torsadées** sont formés de deux fils en cuivre isolés, torsadés l'un autour de l'autre.

### Résistance aux interférences :

Les **câbles coaxiaux** offrent une excellente protection contre les interférences grâce à leur blindage.

Les **câbles à paires torsadées** présentent une résistance variable aux interférences, les câbles blindés (STP) étant plus performants que les câbles non blindés (UTP).

### Distance de transmission :

Les **câbles coaxiaux** sont adaptés aux longues distances.

Les **câbles à paires torsadées** sont généralement limités à environ 100 mètres, surtout pour les catégories modernes.

### Bande passante :

Les **câbles coaxiaux** ont généralement une bande passante inférieure à celle des câbles à paires torsadées.

Les **câbles à paires torsadées** offrent une bande passante plus élevée, en particulier pour les catégories récentes.

### Coût :

Les **câbles coaxiaux** sont généralement plus chers.

Les **câbles à paires torsadées** sont moins coûteux.

### Applications typiques :

Les **câbles coaxiaux** sont utilisés pour la télévision par câble, l'Internet et les systèmes de sécurité.

Les **câbles à paires torsadées** sont utilisés dans les réseaux locaux, la téléphonie et les transmissions de données.

# 3



## Fibres Optiques

### Dans ce chapitre

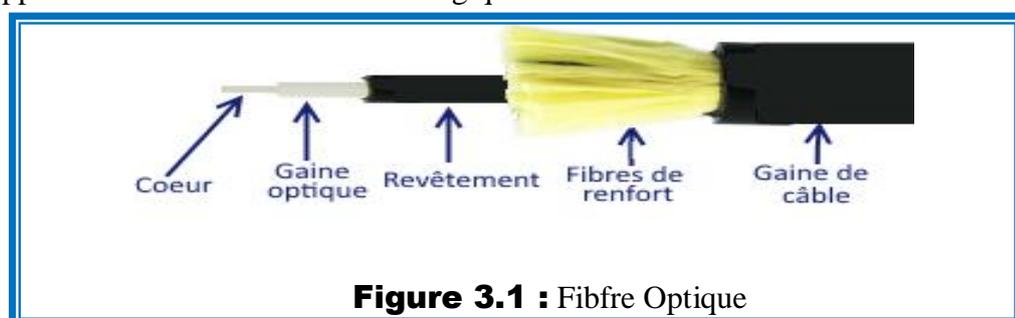
---

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

## Fibres Optiques

### 3.1. Introduction

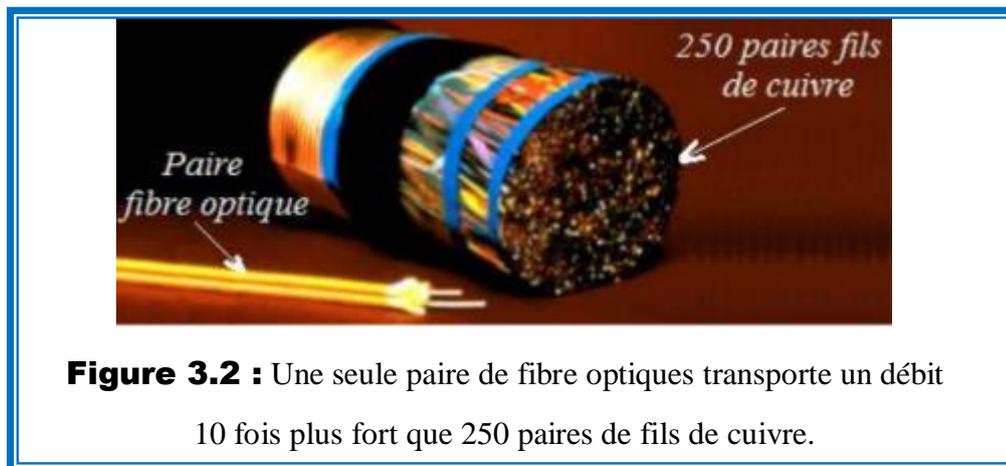
Les fibres optiques représentent une innovation majeure dans le domaine des télécommunications modernes. Utilisées pour transmettre des données sous forme de signaux lumineux, elles offrent une alternative révolutionnaire aux câbles électriques traditionnels. Grâce à leur capacité exceptionnelle à transporter des informations à très haut débit sur de longues distances, les fibres optiques ont transformé les infrastructures de communication mondiale, jouant un rôle central dans l'avènement d'Internet haut débit et des réseaux de téléphonie moderne. Leur principe repose sur la propagation de la lumière à travers un fil en verre ou en plastique ultra-fin, utilisant le phénomène de réflexion totale interne. Cette technologie présente plusieurs avantages décisifs : une bande passante élevée, une faible atténuation du signal, une résistance aux interférences électromagnétiques et une sécurité accrue des transmissions. Ainsi, les fibres optiques constituent aujourd'hui l'épine dorsale des réseaux de télécommunications, facilitant les communications internationales, le déploiement de la 5G et le développement des infrastructures numériques essentielles pour l'économie mondiale. En résumé, l'adoption généralisée des fibres optiques a marqué une étape décisive dans l'évolution des systèmes de communication, offrant des performances sans précédent et ouvrant la voie à de nouvelles applications et innovations technologiques.



**Figure 3.1 :** Fibre Optique

### 3.2. Les télécommunications

En télécommunications, la fibre optique est utilisée pour la transmission d'information, que ce soit des conversations téléphoniques, des images ou des données. C'est probablement l'un des domaines où l'utilisation de la fibre optique est le plus important et a le plus d'avenir. Un fil de cuivre ne peut supporter que quelques communications, contre 300000 pour la fibre optique. Les fibres sont alors utilisées en particulier pour les réseaux à haut débit. Leurs capacités de transmission atteignent des débits de l'ordre du gigabit par seconde (câbles transatlantiques) avec une atténuation très faible et grâce aux multiplexages, on atteint la centaine de Gbits/s.



### 3.3. Les fibres optiques

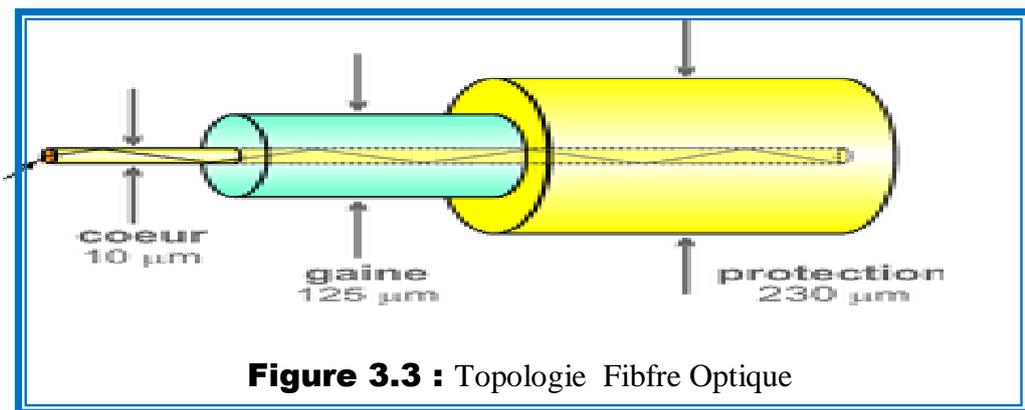
Les fibres optiques sont des conducteurs utilisés dans les systèmes de télécommunication pour transmettre des données sous forme de signaux lumineux, plutôt que des signaux électriques comme dans les câbles métalliques traditionnels. Elles sont constituées de fils extrêmement fins en verre ou en plastique, conçus pour guider la lumière à travers des réflexions internes successives.

Les fibres optiques offrent de nombreux avantages par rapport aux câbles métalliques, tels que :

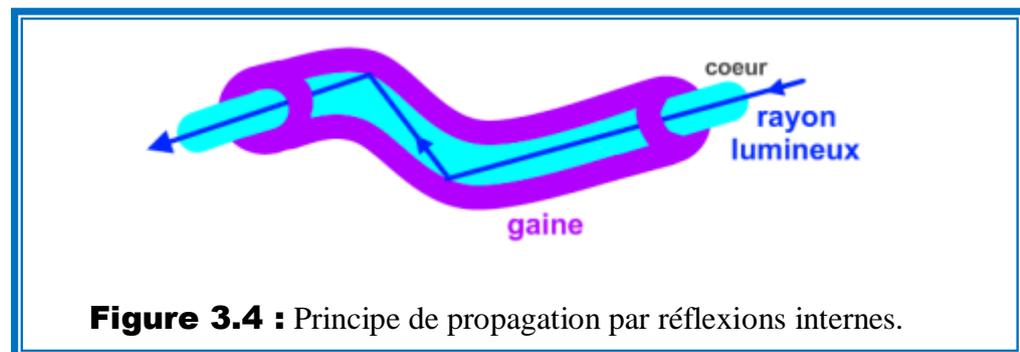
1. **Large bande passante** : Les fibres optiques peuvent transporter une quantité beaucoup plus grande de données sur de longues distances sans perte significative de signal, offrant ainsi un débit beaucoup plus élevé.
2. **Moins de pertes de signal** : Grâce à la faible absorption et à l'absence d'interférences électromagnétiques, les signaux optiques subissent beaucoup moins de dégradation que les signaux électriques dans les câbles en cuivre.

3. **Immunité aux interférences** : Les fibres optiques sont insensibles aux interférences électromagnétiques, ce qui les rend idéales pour les environnements à forte perturbation électromagnétique.

4. **Légèreté et sécurité** : Elles sont plus légères et plus résistantes aux conditions environnementales que les câbles traditionnels en cuivre. De plus, les fibres optiques ne produisent pas de rayonnements radiofréquences, offrant ainsi une meilleure sécurité en matière de protection des données.



Les fibres optiques sont largement utilisées dans les réseaux de télécommunications modernes, notamment pour les connexions Internet à haut débit, les câbles sous-marins reliant les continents, ainsi que dans les systèmes de télévision, de téléphonie et de données.

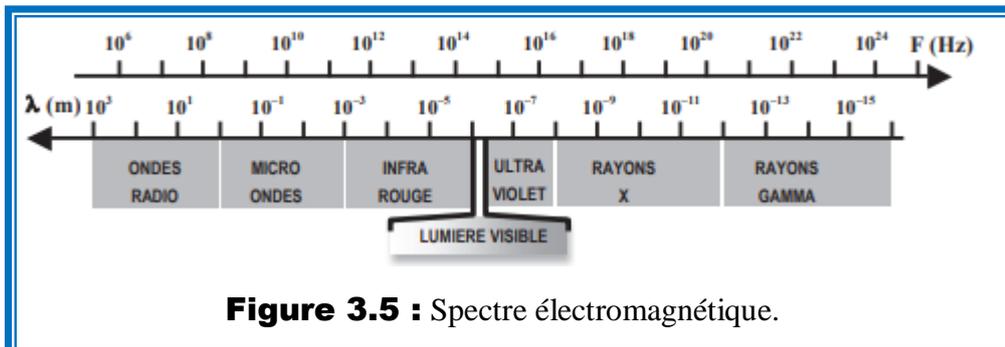


En pratique, plusieurs fibres optiques sont rassemblées dans un câble à l'intérieur d'une gaine blindée pour la protection mécanique.

### 3.4. Spectre électromagnétique et fibre optique

La fibre optique transmet des ondes électromagnétiques, mais elle n'utilise qu'une très petite partie du spectre électromagnétique constitué par les rayons gamma, les rayons X, l'ultraviolet, le visible, l'infrarouge, les microondes ou hyperfréquences et les ondes radio. Le diagramme qui suit donne un

aperçu global du spectre électromagnétique avec les longueurs d'onde  $\lambda$  (lire lambda) données en mètre et les fréquences associées F données en Hertz.



**Figure 3.5 :** Spectre électromagnétique.



**Figure 3.6 :** Gaine blindée de câble de fibre optiques.

### 3.5. Caractéristiques des fibres optiques :

Les fibres optiques possèdent plusieurs caractéristiques essentielles qui les distinguent des autres supports de transmission. Voici les principales :

#### 1. Structure de la fibre optique :

- **Cœur (Core)** : Partie centrale, où la lumière se propage. Sa taille varie selon le type de fibre (9 microns pour les fibres monomodes, 50 ou 62,5 microns pour les multimodes).
- **Gaine optique (Cladding)** : Entoure le cœur et permet la réflexion totale interne.
- **Revêtement (Coating)** : Couche de protection extérieure contre les dommages mécaniques.

#### 2. Types de fibres optiques :

- **Fibre monomode (SMF)** : Cœur très fin (9 microns), utilisée pour les longues distances avec une faible atténuation. La lumière se propage en ligne droite, limitant la dispersion.

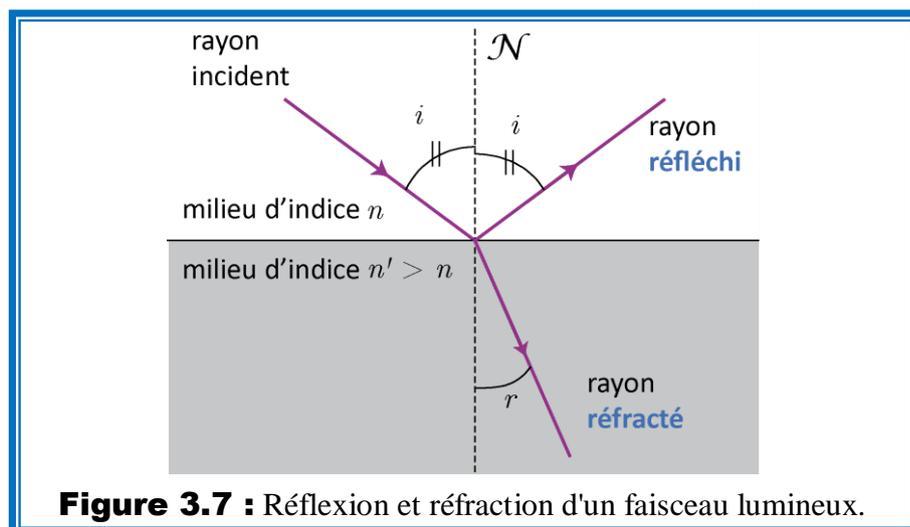
- **Fibre multimode (MMF)** : Cœur plus large (50 à 62,5 microns), adaptée aux courtes distances. Plusieurs modes de propagation entraînent une dispersion modale plus importante.

### 3.6. Propriétés optiques :

- **Atténuation** : Perte de puissance du signal lumineux sur une certaine distance, mesurée en décibels par kilomètre (dB/km). Elle est très faible dans les fibres modernes, particulièrement en silice.
- **Dispersion** :
  - **Dispersion chromatique** : Due à la variation de la vitesse de propagation des différentes longueurs d'onde.
  - **Dispersion modale** : Propre aux fibres multimodes, où les différents chemins des rayons lumineux entraînent un étalement du signal.
- **Bande passante** : Très élevée, permettant la transmission de grandes quantités de données à des vitesses impressionnantes.

### 3.7. Principe de guidage de la lumière dans une fibre optique

Un faisceau lumineux incident dans un milieu 1 avec un angle  $\theta_i$ , sera réfléchi avec un angle  $\theta_r$  et réfracté avec un angle  $\theta_t$  au passage du milieu 1 vers un milieu 2.



Les indices de réfraction ( $n_1$ ,  $n_2$ ) mesurent le rapport entre la vitesse de propagation du rayon lumineux dans le milieu 1 et celle dans le milieu 2 respectivement. L'indice de réfraction dans un milieu est donné par :

$$n = \frac{c}{v}$$

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.

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

### 3.8. Principe de fonctionnement

Les fibres optiques fonctionnent selon un principe physique appelé **réflexion totale interne**. Lorsqu'un faisceau lumineux entre dans la fibre à un angle précis, il est complètement réfléchi à l'intérieur de la fibre, ce qui permet à la lumière de voyager sur de longues distances sans s'échapper.

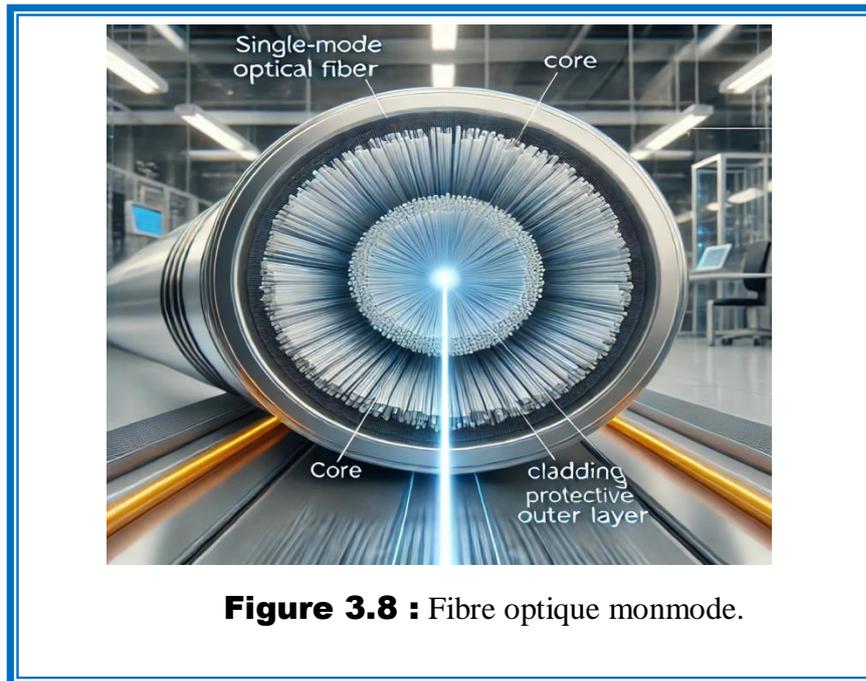
- **Composants de la fibre optique :**
- **Le noyau :** C'est la partie centrale de la fibre, qui transporte la lumière. Il est généralement fait de verre ou de plastique et a un indice de réfraction élevé.
- **La gaine :** Enroulant le noyau, la gaine a un indice de réfraction plus faible, ce qui permet la réflexion de la lumière à l'intérieur du noyau.
- **Le revêtement extérieur :** Il protège la fibre des dégâts physiques et de l'humidité.
- Le principe de la réflexion totale interne permet aux signaux lumineux de se propager dans la fibre sur de très longues distances avec une faible perte de signal.

### 3.9. Types de fibres optiques

Il existe principalement deux types de fibres optiques : les **fibres monomodes** et les **fibres multimodes**. Chaque type a des caractéristiques spécifiques adaptées à des usages différents.

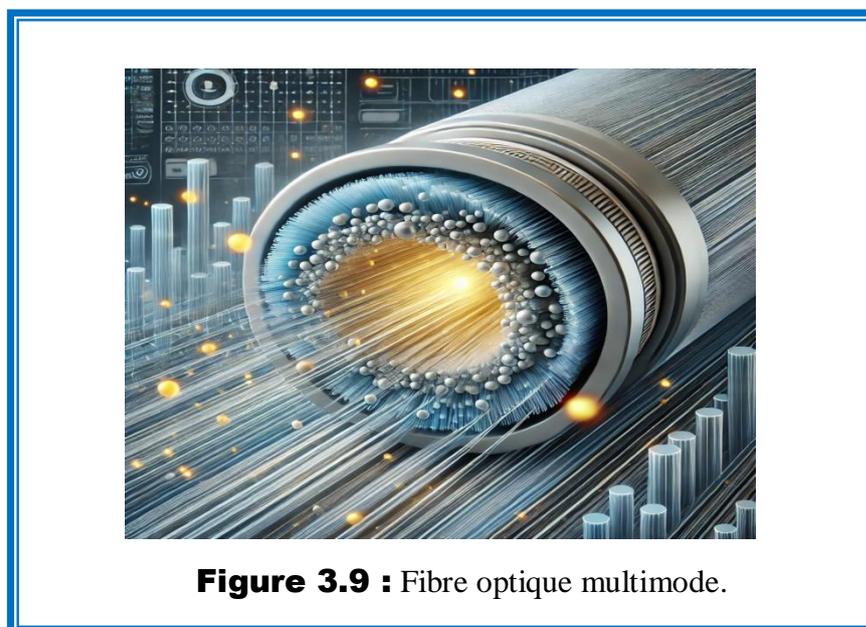
- **Fibres monomodes :**

Ces fibres ont un noyau très fin (environ 8 à 10 micromètres de diamètre) et permettent à la lumière de se propager dans une seule voie. Cela permet de transmettre des données à des vitesses très élevées et sur de très longues distances (jusqu'à 100 km sans amplification), ce qui les rend idéales pour les réseaux télécoms et internet haut débit. L'image ci-dessous représente une fibre optique monomode, avec ses différentes couches et la transmission de la lumière à travers le cœur.



- **Fibres multimodes :**

Le noyau de ces fibres est plus large (environ 50 à 62,5 micromètres de diamètre), ce qui permet à la lumière de se propager sur plusieurs voies. Cela rend la transmission moins rapide et plus sujette à la dispersion, mais ces fibres sont moins coûteuses et sont utilisées pour des connexions sur de courtes distances, comme dans les réseaux locaux (LAN). L'image ci-dessous illustrant une fibre optique multimode, montrant les différentes trajectoires lumineuses dans son cœur plus large.



### 3.10. Applications des fibres optiques

Les fibres optiques sont utilisées dans une variété de secteurs grâce à leurs propriétés exceptionnelles.

#### ✚ Télécommunications et Internet :

Les fibres optiques sont à la base des réseaux de communication modernes. Elles permettent des connexions internet à très haut débit, parfois jusqu'à 1 Gbps (gigabit par seconde) ou plus. Par exemple, les câbles sous-marins reliant les continents sont majoritairement composés de fibres optiques.

#### ✚ Médecine :

Les fibres optiques sont aussi utilisées en **endoscopie**, où elles permettent aux médecins d'examiner l'intérieur du corps humain sans nécessiter de chirurgie invasive. L'**imagerie médicale** et les lasers chirurgicaux utilisent aussi des fibres optiques pour des traitements plus précis et moins douloureux.

✓ Pour le diagnostic, un câble de fibres optiques transporte de la lumière à l'intérieur du corps. Cette lumière est réfléchiée par les organes internes et est captée par un autre câble de fibres optiques qui achemine cette lumière vers un système d'imagerie vidéo. Il est donc possible d'avoir un aperçu de grande qualité de ce qui se passe dans le corps, et ce, en temps réel. Un exemple de cette utilisation est l'endoscope, particulièrement utilisé en gastro-entérologie.



**Figure 3.10** : Un endoscope.

✓ Pour un traitement, la fibre optique sert à transporter la lumière intense d'un laser à l'intérieur du corps humain où elle interagira par effet thermique avec les tissus : en chirurgie associée à un faisceau laser qui permet de : pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur, réparer une rétine...etc



**Figure 3.11 :** Chirurgie.

La fibre optique facilite donc le travail des professionnels de la santé ainsi que la vie de leurs patients. Les interventions sont moins complexes, moins dangereuses et moins invasives que la chirurgie traditionnelle. De plus, puisqu'elles ne nécessitent le plus souvent qu'une anesthésie locale, le patient peut subir l'intervention et retourner chez lui la même journée. L'application de ces techniques de diagnostic et de traitement a donc eu une incidence importante sur le plan économique.

#### **+** Les capteurs

Un domaine où la fibre optique a trouvé une application plus récemment est celui de la mesure. La fibre optique, comme tout objet, subit les influences de différents paramètres. Elle sera, entre autres, légèrement déformée lorsqu'elle est soumise à une pression, une force, une contrainte ou une variation de température. La déformation subit par la fibre optique aura une influence sur la façon dont la lumière s'y propage. Il est possible de mesurer ces modifications et de convertir cette mesure en unités de pression, de température ou de force, selon ce qu'on désire mesurer. Ces capteurs ont l'avantage d'être très petits, très précis et insensibles aux perturbations électromagnétiques.

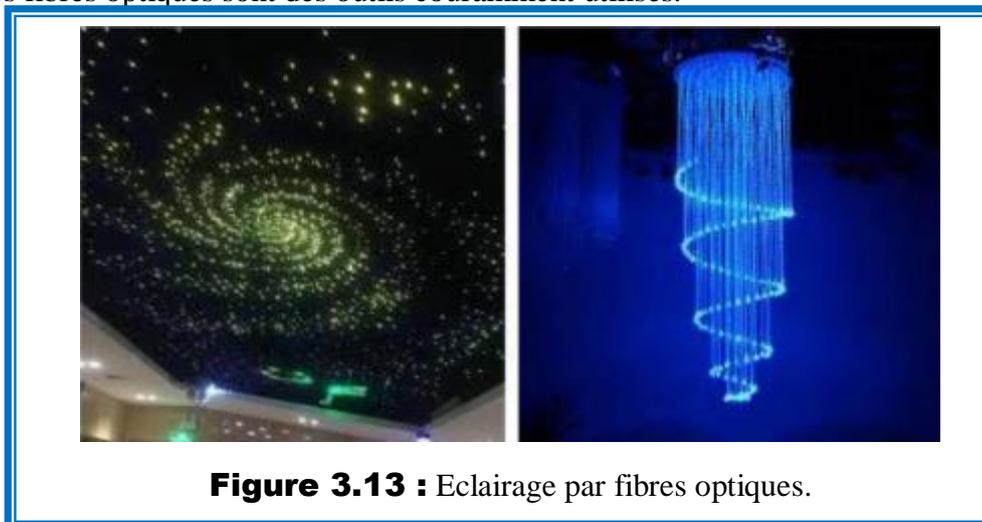


**Figure 3.12 :** Capteur pour mesurer la pression dans les vaisseaux sanguins.

#### **+** L'éclairage

Dans le domaine de l'éclairage, les fibres optiques sont aussi très utilisées, en muséographie, architecture, et aménagement d'espaces d'agrément public et domestique.

Enfin, dans le balisage, la décoration, la signalétique d'orientation ou encore en signalisation routière, les fibres optiques sont des outils couramment utilisés.



#### + Transports et industrie :

Les fibres optiques sont utilisées pour les capteurs dans les **systèmes de contrôle automatisés** des trains, des avions, et dans d'autres applications industrielles où la détection de variations minimales est essentielle.

### 3.11. Avantages et inconvénients

#### Avantages :

Les fibres optiques présentent plusieurs avantages par rapport aux câbles métalliques traditionnels.

#### + Vitesse de transmission élevée :

Les signaux lumineux voyagent à des vitesses proches de celle de la lumière, ce qui permet une transmission de données extrêmement rapide, essentielle pour le fonctionnement d'Internet moderne.

#### + Capacité de bande passante élevée :

Une seule fibre optique peut transporter une quantité énorme de données, bien plus que les câbles en cuivre.

#### + Moins de perte de signal :

En raison de la faible résistance électrique et de la faible atténuation du signal dans les fibres, il y a beaucoup moins de perte de signal sur de longues distances par rapport aux câbles en cuivre ou en aluminium.

#### ✚ Moins de perturbations électromagnétiques :

Contrairement aux câbles métalliques, les fibres optiques ne sont pas affectées par les interférences électromagnétiques, ce qui les rend idéales pour les environnements où des perturbations extérieures sont possibles.

### 3.12. Limites et défis des fibres optiques

Bien que les fibres optiques offrent de nombreux avantages, elles présentent aussi quelques limitations.

#### ✚ Coût élevé d'installation :

La fabrication et l'installation de fibres optiques peuvent être coûteuses, surtout sur de longues distances ou dans des zones difficiles d'accès.

#### ✚ Fragilité :

Les fibres optiques en verre sont fragiles et peuvent se casser facilement si elles sont courbées trop fortement ou si elles subissent des pressions importantes.

#### ✚ Maintenance complexe :

Réparer des fibres optiques peut être plus délicat que pour des câbles métalliques. De plus, il est parfois nécessaire de relier plusieurs fibres optiques avec une très grande précision, ce qui demande des compétences techniques particulières.

### 3.13. Angle d'incidence critique

La réflexion totale d'un rayon lumineux à l'intérieur d'une fibre optique se produit lorsque le rayon rencontre la surface de la fibre avec un angle d'incidence supérieur à l'angle critique. L'angle critique est déterminé par la relation entre les indices de réfraction des deux milieux impliqués, c'est-à-dire le cœur de la fibre et sa gaine. La condition pour la réflexion totale est généralement exprimée par la loi de Snell-Descartes, qui donne la relation entre l'angle d'incidence ( $\theta_i$ ), l'angle de réfraction ( $\theta_t$ ) et les indices de réfraction des deux milieux ( $n_1$  pour le noyau de la fibre et  $n_2$  pour la gaine):

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t)$$

Lorsque le rayon lumineux passe d'un milieu d'indice de réfraction plus élevé (cœur de la fibre) à un milieu d'indice de réfraction plus bas (gaine), il existe un angle critique au-delà duquel la lumière est réfléchie totalement à l'interface plutôt que de se réfracter. Cet angle critique ( $\Theta_c$ ) peut être trouvé en fixant l'angle de réfraction ( $\Theta_t$ ) à 90 degrés:

Ainsi, la condition pour la réflexion totale dans une fibre optique est que l'angle d'incidence ( $\Theta_i$ ) soit supérieur à l'angle critique ( $\Theta_c$ ):

$$\theta_i > \theta_c$$

L'utilisation de la réflexion totale dans les fibres optiques est fondamentale pour le fonctionnement des systèmes de communication optique, où la lumière est guidée à travers la fibre sur de longues distances avec peu de perte d'intensité.

# 4



## Faisceau Hertiens

### Dans ce chapitre

---

- ↪ Généralités
  - ↪ principales fréquences et bandes
  - ↪ liaisons satellite
-

# Chapitre 4

---

## Faisceau Hertziens

### 4.1. Notions générales

#### 4.1.1. Un peu d'histoire

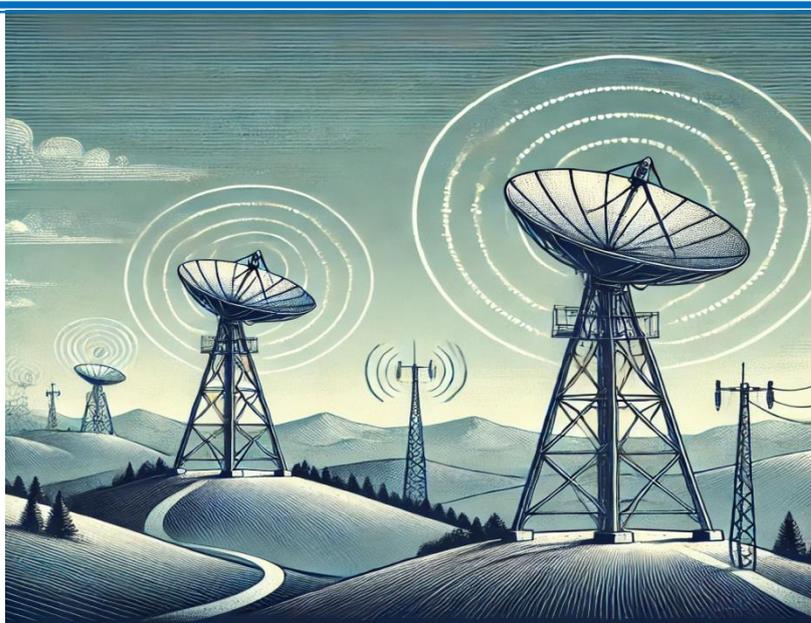
Descartes affirmait que le langage est le propre de l'homme, hors le langage, c'est la communication ! La communication à distance, c'est à dire la transmission à distance de l'information, a toujours été une préoccupation humaine importante. Primitivement, les premiers moyens de communication à distance étaient des signaux de fumée, ou des tam-tam. Plus tard, dans l'Antiquité, avec l'invention de l'écriture, des messagers pouvaient transporter à pied ou à cheval des messages écrits. La vitesse de transmission de l'information était bien plus lente qu'aujourd'hui. Vers 1800, le télégraphe Chappe permettait de transmettre des messages en utilisant des signaux optiques à l'aide de sémaphores. Un réseau de tours espacées de 10 à 30 km permettait de répéter les signaux. Il fallait environ six heures pour transmettre un message de Paris à Lille. En 1832, Samuel Morse invente le télégraphe. C'est le premier système de transmission utilisant des signaux électriques se propageant sur une ligne. On transmet sur la ligne une suite d'impulsions brèves ou longues pour créer des symboles (lettres de l'alphabet). Cette grande invention nécessitait cependant un support physique (une ligne électrique) entre l'émetteur et le récepteur. A la fin du XIXe siècle, les physiciens mettent en évidence les ondes électromagnétiques : en 1864, Maxwell établit les équations qui prouvent l'existence des ondes électromagnétiques, mais cela reste purement théorique. Plus de vingt ans après, Hertz met en évidence expérimentalement les théories de Maxwell, mais les ondes auxquelles il donne son nom (les ondes hertziennes) restent encore pour beaucoup une curiosité de laboratoire. En 1895, Guglielmo Marconi, un physicien italien réalise la première transmission radio sur une distance de 1,5 km. Six ans après, il réalise la première liaison transatlantique sans fil entre les Cornouailles (Angleterre) et Terre-Neuve (Canada). Au cours du XXe siècle, les progrès sont spectaculaires avec le développement de la radiodiffusion, de la télévision, de la téléphonie

mobile. En 2012, en France, il y a 72 millions de cartes SIM (donc d'abonnés au téléphone mobile) en circulation pour 65 millions d'habitants ! Notre époque est celle des télécommunications ! l'illustration ci dessous est d'un faisceau hertzien avec des antennes paraboliques sur des tours de télécommunication.



**Figure 4.1 :** Antennes paraboliques

Et l'image ci après représentant un faisceau hertzien, avec deux grandes antennes paraboliques alignées pour transmettre des signaux à travers une ligne de visée :



**Figure 4.2 :** Représentation d'un faisceau hertzien

## 4.2. Intérêt des liaisons hertziennes

### 4.2.1 Les supports de transmission Dans les télécommunications

On distingue trois grandes familles de supports de transmission de l'information :

- les liaisons filaires (ou lignes de transmission),
- les liaisons hertziennes,
- les liaisons optiques.

Il existe deux types de liaisons optiques :

- les liaisons optiques guidées comme les liaisons par fibre optique,
- les liaisons optiques en espace libre, comme par exemple : la liaison infrarouge entre une télécommande et un téléviseur.

### 4.2.2 Intérêts et inconvénients

L'intérêt principal des liaisons hertziennes est qu'elles ne nécessitent aucun support physique entre l'émetteur et le récepteur de l'information. Elles sont donc 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 un seul émetteur transmet la même information à 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 avec 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 peut être corrigé en effectuant un cryptage de l'information entre l'émetteur et le récepteur.

### 4.2.3 Les systèmes utilisant les liaisons hertziennes

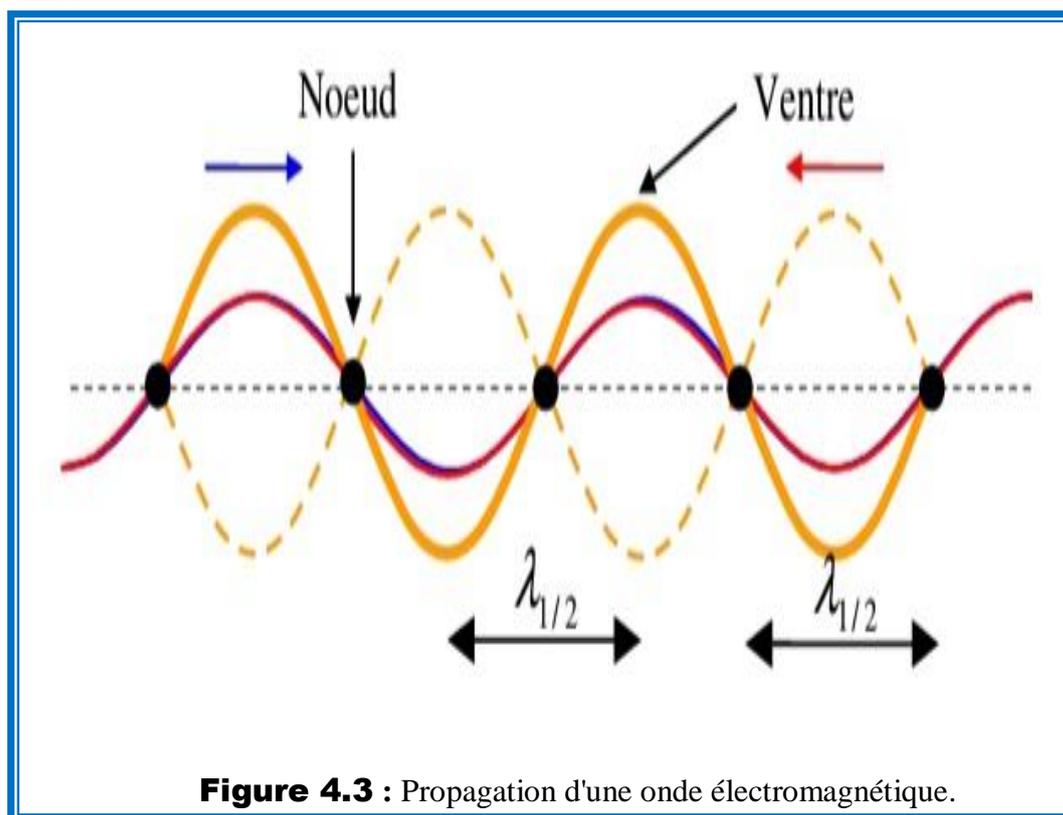
Voici quelques exemples de systèmes utilisant les liaisons hertziennes, la liste qui suit n'est, bien sûr, pas exhaustive. D la radiodiffusion (en modulation d'amplitude ou de fréquence), D la

télédiffusion (analogique ou numérique, terrestre ou par satellite), D les radiocommunications : talkie-walkie, CB, liaison VHF pour avions ou bateaux, les faisceaux hertziens, D la téléphonie : téléphone DECT (réseau de téléphones sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise), téléphone mobile, D Internet : liaison Wi-Fi (réseau Internet sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise).

### 4.3. La propagation des ondes électromagnétiques

#### 4.3.1 Rappel sur les ondes électromagnétiques

Dans une liaison hertzienne, c'est une onde électromagnétique qui « porte » l'information à transmettre. Une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique  $\vec{H}$ , couplés entre eux : les deux champs sont perpendiculaires l'un à l'autre, leurs amplitudes sont en rapport constant et leurs variations sont en phase. L'onde se propage à la vitesse de la lumière.



#### 4.3.2 Caractéristiques d'une onde électromagnétique

Les caractéristiques principales d'une onde électromagnétique sont :

**La polarisation** : c'est l'orientation du champ électrique par rapport à l'horizontale. Si le champ  $\vec{E}$  est parallèle à l'horizontale, on dit que l'onde a une polarisation horizontale. Si le champ  $\vec{E}$  est

perpendiculaire à l'horizontale, on dit que l'onde a une polarisation verticale. Dans le cas général où l'angle du champ  $\vec{E}$  est quelconque, on a alors une composante horizontale et une composante verticale. Certaines antennes génèrent des ondes qui ont une polarisation circulaire ou elliptique : la polarisation varie au cours de la propagation. Cette notion sera revue plus loin, lors de l'étude des antennes.

**La vitesse de propagation** : dans le vide, une onde électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière  $c = 3.10^8$  m/s.

**La fréquence** : en un point donné, c'est le nombre de maxima de champ par seconde. Elle est égale à la fréquence du générateur qui a donné naissance à l'onde. L'unité est le Hertz. On la note  $f$ .

**La longueur d'onde** : c'est la distance entre deux maximums consécutifs, mais c'est aussi la distance parcourue par l'onde pendant la durée d'une période. On la note  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{ou} \quad \lambda = c \cdot T$$

avec  $\lambda$  : longueur d'onde (en m),  $c$  : vitesse de la lumière = 3.108 m/s,  $f$  : fréquence (en Hz) et  $T$  : période (en s).

#### 4.4. Bandes de fréquences principales :

##### Bande HF (High Frequency) : 3 à 30 MHz

- **Applications** : Communications maritimes, aéronautiques, militaires, radio amateur.
- **Avantage** : Portée longue distance (réflexion ionosphérique).
- **Limitation** : Sensible aux perturbations atmosphériques.

##### Bande VHF (Very High Frequency) : 30 à 300 MHz

- **Applications** : Radiodiffusion FM, télévision analogique, communications aéronautiques, services de sécurité publique.
- **Avantage** : Bonne portée en ligne de vue, pénétration raisonnable à travers les bâtiments.
- **Limitation** : Portée limitée par la courbure terrestre.

##### Bande UHF (Ultra High Frequency) : 300 MHz à 3 GHz

- **Applications** : Télévision numérique terrestre (TNT), téléphonie mobile (GSM, 3G), radio numérique, systèmes de communication privée (PMR).
- **Avantage** : Transmission efficace à courte et moyenne distance, bonne pénétration dans les environnements urbains.

- **Limitation** : Sensible aux obstacles physiques.

#### **Bande SHF (Super High Frequency) : 3 à 30 GHz**

- **Applications** : Liaisons micro-ondes, réseaux satellitaires, Wi-Fi (2,4 GHz et 5 GHz), radar, télécommunications mobiles (4G, 5G).
- **Avantage** : Haute capacité de transmission des données.
- **Limitation** : Atténuation accrue par les conditions atmosphériques (pluie, brouillard).

#### **Bande EHF (Extremely High Frequency) : 30 à 300 GHz**

- **Applications** : Communications point à point à très haut débit, 5G (bande millimétrique), satellites, capteurs radar avancés.
- **Avantage** : Très large bande passante, permettant des débits élevés.
- **Limitation** : Forte atténuation atmosphérique, portée limitée, nécessite une ligne de vue parfaite.

### **4.5. Bandes spécifiques dans les télécommunications :**

#### **Wi-Fi :**

- **2,4 GHz** (bande ISM) : Bonne portée, mais congestionnée.
- **5 GHz** : Débits plus élevés, portée plus courte.
- **6 GHz** (Wi-Fi 6E) : Nouvelle bande avec plus de canaux disponibles, moins de congestion.

#### **Téléphonie mobile :**

- **GSM/2G** : 900 MHz, 1800 MHz.
- **3G/UMTS** : 900 MHz, 2100 MHz.
- **4G/LTE** : 800 MHz, 1800 MHz, 2600 MHz.
- **5G** :
  - **Sub-6 GHz** : 700 MHz, 3,5 GHz.
  - **Bande millimétrique (mmWave)** : 26 GHz, 28 GHz.

#### **Liaisons micro-ondes point-à-point :**

- **4 GHz à 42 GHz** selon l'application et la distance de la liaison.

#### **Satellites :**

- **Bande C** (4-8 GHz) : Communications satellites, moins affectée par la pluie.
- **Bande Ku** (12-18 GHz) : Télévision par satellite (DTH).
- **Bande Ka** (26-40 GHz) : Internet par satellite haut débit.

**Attribution des fréquences :**

Les fréquences sont régulées au niveau international par l'UIT (**Union Internationale des Télécommunications**), et au niveau national par des agences comme l'ARCEP en France. Elles définissent les usages et évitent les interférences entre les différents services.

**4.6. Les liaisons satellites**

Les liaisons satellites sont des systèmes de communication utilisant des satellites en orbite pour transmettre des signaux entre des stations terrestres situées à de grandes distances. Elles permettent des connexions globales pour la téléphonie, la télévision, l'internet, la navigation, et d'autres applications spécifiques. Voici les principaux types de liaisons satellites et leurs caractéristiques :

**4.6.1. Types de liaisons satellites :****1. Liaisons ascendantes (Uplink)**

- **Description** : Transmission de signaux depuis une station terrestre vers un satellite.
- **Fréquences courantes** :
  - **Bande C** : 5,925 - 6,425 GHz
  - **Bande Ku** : 14 - 14,5 GHz
  - **Bande Ka** : 27,5 - 31 GHz

**2. Liaisons descendantes (Downlink)**

- **Description** : Transmission de signaux depuis un satellite vers une station terrestre.
- **Fréquences courantes** :
  - **Bande C** : 3,7 - 4,2 GHz
  - **Bande Ku** : 10,7 - 12,75 GHz
  - **Bande Ka** : 17,7 - 21,2 GHz

**Types d'orbites satellitaires :****1. Orbite géostationnaire (GEO)**

- **Altitude** : Environ 35 786 km au-dessus de l'équateur.
- **Caractéristique** : Le satellite reste fixe par rapport à un point de la Terre.
- **Applications** : Télévision par satellite, télécommunications, météorologie.
- **Avantage** : Couverture continue d'une large zone terrestre.
- **Inconvénient** : Latence élevée (~240 ms en aller-retour).

## 2. Orbite terrestre moyenne (MEO)

- **Altitude** : Entre 2 000 et 20 000 km.
- **Caractéristique** : Utilisée principalement pour les systèmes de navigation (GPS, Galileo, GLONASS).
- **Applications** : Navigation satellitaire, certaines liaisons de télécommunications.
- **Avantage** : Meilleur compromis entre couverture et latence.
- **Inconvénient** : Nécessite plusieurs satellites pour une couverture continue.

## 3. Orbite terrestre basse (LEO)

- **Altitude** : Entre 300 et 2 000 km.
- **Caractéristique** : Les satellites passent rapidement au-dessus d'une zone donnée.
- **Applications** : Constellations pour l'internet haut débit (Starlink, OneWeb), imagerie terrestre.
- **Avantage** : Latence faible, débit élevé.
- **Inconvénient** : Nécessite un grand nombre de satellites pour une couverture globale.

### Types de satellites de communication :

#### 1. Satellites de diffusion (Broadcast)

- **Utilisation** : Télévision (DTH – Direct-to-Home), radio.
- **Exemple** : Astra, Hot Bird.

#### 2. Satellites de télécommunications fixes (FSS - Fixed Satellite Service)

- **Utilisation** : Liaisons point-à-point pour les réseaux de télécommunication.
- **Exemple** : Intelsat, Eutelsat.

#### 3. Satellites de télécommunications mobiles (MSS - Mobile Satellite Service)

- **Utilisation** : Téléphonie satellite, communication maritime et aéronautique.
- **Exemple** : Iridium, Inmarsat.

#### 4. Constellations de satellites Internet

- **Utilisation** : Fournir l'accès Internet à haut débit dans les zones reculées.
- **Exemple** : Starlink (SpaceX), OneWeb, Amazon Kuiper.

### Applications courantes des liaisons satellites :

- **Télécommunications** : Services voix et données dans les régions isolées.
- **Télévision par satellite** : Transmission directe aux utilisateurs finaux.
- **Internet haut débit** : Connexion dans les zones rurales ou difficiles d'accès.

- **Navigation** : GPS, Galileo, GLONASS.
- **Surveillance météorologique** : Prévisions météo globales.
- **Défense et sécurité** : Communications militaires sécurisées.
- **Recherche scientifique** : Observation de la Terre, collecte de données climatiques.

# 5



## **Faisceaux lumineux (infrarouge et visible) en espace libre**

### **Dans ce chapitre**

---

- ↪ Spectres
  - ↪ Intérêts et limites
  - ↪ Sources infrarouge
  - ↪ Sources de lumière visible (Exemples : LED et Laser)
  - ↪ Applications
-

## Faisceau infrarouge

### 5.1. Introduction

Dans le domaine des télécommunications, un **faisceau infrarouge** désigne une technologie de transmission sans fil qui utilise des ondes infrarouges (IR) pour transmettre des données entre deux points, généralement sur de courtes distances. Cette technologie fait partie de la famille des communications optiques, mais contrairement aux faisceaux hertziens ou aux fibres optiques, les faisceaux infrarouges utilisent la lumière dans la gamme infrarouge du spectre électromagnétique, qui est située juste en dessous de la lumière visible (généralement entre 300 GHz et 400 THz).



**Figure 5.1** : Exemple d'un VPN

l'illustrationci-dessus représentant un système de communication infrarouge (faisceau infrarouge), où deux appareils échangent des données à courte distance à travers des ondes lumineuses infrarouges. **faisceau infrarouge**

## 5.2. Histoire et développement de la technologie

Les faisceaux infrarouges ont vu leur première utilisation dans les années 1960, dans des systèmes de contrôle à distance tels que les télécommandes. Avec l'avancement de la technologie et la miniaturisation des composants électroniques, leur utilisation s'est étendue aux réseaux sans fil pour la transmission de données. Contrairement aux systèmes de transmission par radiofréquences ou micro-ondes, les faisceaux infrarouges n'interfèrent pas avec les autres formes de communication électromagnétique, ce qui les rend particulièrement efficaces dans des environnements densément peuplés d'appareils sans fil.

## 5.3. Importance dans les télécommunications modernes

Dans les télécommunications modernes, les faisceaux infrarouges jouent un rôle complémentaire aux technologies sans fil telles que le Wi-Fi, le Bluetooth ou les faisceaux hertziens. Ils offrent des solutions simples pour des communications à très courte portée et dans des espaces confinés comme les bureaux, les entrepôts, et les centres de données. Leur efficacité est particulièrement notable dans les environnements où des interférences électromagnétiques sont fréquentes, car les faisceaux infrarouges utilisent des fréquences de lumière qui ne se croisent pas avec celles utilisées par d'autres technologies sans fil.

## 5.4. Caractéristiques du faisceau infrarouge dans les télécommunications :

### 1. Plage de fréquence :

- Les ondes infrarouges utilisées pour la transmission se trouvent généralement dans la bande de fréquence **30 THz à 400 THz**. Elles sont plus courtes que les micro-ondes utilisées pour les faisceaux hertziens, offrant un transfert rapide de données.

### 2. Avantages :

- **Haute capacité de transmission** : Les faisceaux infrarouges peuvent transporter des débits de données très élevés sur des distances relativement courtes, idéaux pour des applications telles que la communication à haute vitesse dans les zones urbaines ou de campus.

- **Sécurisé** : Le faisceau infrarouge est moins susceptible aux interférences électromagnétiques (EMI) par rapport aux technologies basées sur les ondes radio, ce qui en fait une option sécurisée pour les communications sensibles.
- **Facilité d'installation** : Les faisceaux infrarouges nécessitent peu d'infrastructure en dehors des dispositifs émetteurs et récepteurs, ce qui simplifie leur mise en œuvre dans des environnements à espace limité.

### 3. Limites :

- **Portée limitée** : Les faisceaux infrarouges sont généralement limités à des distances courtes (quelques centaines de mètres), en raison de l'absorption de l'onde par l'atmosphère et d'autres obstacles.
- **Bande étroite** : Les faisceaux infrarouges nécessitent une ligne de vue directe entre l'émetteur et le récepteur, car ils ne traversent pas facilement les obstacles solides (murs, bâtiments, etc.).
- **Sensible aux conditions atmosphériques** : Bien que plus résistant que les faisceaux hertziens dans certaines conditions, l'infrarouge peut être affecté par l'humidité, la pluie, et la poussière.

## 5.5. Applications :

- **Communication sans fil de courte portée** : Utilisé dans les réseaux locaux sans fil (comme **IrDA** - Infrared Data Association), notamment pour des connexions de données entre appareils à proximité, tels que les smartphones, les ordinateurs portables, ou les imprimantes.
- **Communication point-à-point** : Dans les environnements fermés ou entre bâtiments proches, tels que les complexes industriels ou les campus universitaires.
- **Contrôle à distance et transmission de données** : Les télécommandes, les capteurs de mouvement, et les systèmes de contrôle de dispositifs utilisent souvent la technologie infrarouge.

En résumé, les faisceaux infrarouges sont une méthode de communication sans fil rapide et sécurisée pour des distances relativement courtes, utilisée dans diverses applications de transmission de données et de contrôle.

## 5.6. Principes de fonctionnement des faisceaux infrarouges

Les faisceaux infrarouges sont basés sur l'utilisation d'ondes lumineuses dans la gamme infrarouge du spectre électromagnétique, qui va de 300 GHz à 400 THz. Cela se situe juste en dessous du spectre visible, ce qui leur permet de transporter de l'information sans être visibles à l'œil nu.

## 5.7. Le spectre électromagnétique et la gamme infrarouge

Le spectre électromagnétique couvre une vaste gamme de fréquences, de la radio à l'extrême ultraviolet. La lumière infrarouge est classée en trois catégories selon sa longueur d'onde : l'infrarouge proche (0,75 à 1,5  $\mu\text{m}$ ), l'infrarouge moyen (1,5 à 5  $\mu\text{m}$ ) et l'infrarouge lointain (5 à 1000  $\mu\text{m}$ ). Dans les télécommunications, on utilise principalement l'infrarouge proche et moyen pour les faisceaux infrarouges.

## 5.8. Propagation des ondes infrarouges

Les ondes infrarouges se propagent de manière linéaire dans l'air. Cela signifie que, pour qu'un faisceau infrarouge fonctionne efficacement, il doit y avoir une ligne de vue dégagée entre l'émetteur et le récepteur. Ces faisceaux peuvent être affectés par des obstacles physiques comme les murs ou les objets solides, qui absorbent ou réfléchissent les ondes. De plus, la propagation des ondes infrarouges peut être influencée par des conditions atmosphériques telles que la pluie ou l'humidité, bien que cela soit moins problématique que pour d'autres formes de transmission comme les micro-ondes.

## 5.9. Composants impliqués dans le système

Le système de faisceau infrarouge se compose généralement de deux parties essentielles :

**L'émetteur** : Un composant électronique (souvent un laser ou une LED) qui génère le faisceau infrarouge.

**Le récepteur** : Un photodétecteur qui capte le faisceau infrarouge et convertit les signaux lumineux en données exploitables.

Ces composants sont souvent intégrés dans des dispositifs compacts qui permettent la transmission de données à haute vitesse sur de courtes distances.

## 5.10. Types de faisceaux infrarouges

Il existe principalement deux types de faisceaux infrarouges utilisés dans les télécommunications : les faisceaux infrarouges à **ligne de vue** (LOS) et les faisceaux **réfléchis ou diffusés**.

### Faisceaux infrarouges à ligne de vue (LOS)

Les faisceaux infrarouges à ligne de vue (LOS) nécessitent une **ligne de vue directe** entre l'émetteur et le récepteur. Cela signifie qu'aucun objet solide ou obstruant ne doit interférer entre les deux. Ce type de faisceau est le plus couramment utilisé dans les réseaux locaux sans fil, les connexions de type peer-to-peer, ou pour la communication à courte portée entre des appareils comme les télécommandes et les capteurs.

- **Caractéristiques :**
  - **Portée** : Généralement de quelques centimètres à quelques centaines de mètres, selon la puissance du signal.
  - **Bande passante** : Les faisceaux infrarouges peuvent offrir une bande passante élevée, ce qui permet des transferts de données rapides.
  - **Applications** : Utilisation dans des environnements contrôlés comme les bureaux, les entrepôts ou dans des dispositifs comme les télécommandes.

## 5.11. Faisceaux infrarouges réfléchis ou diffusés

Dans certains cas, les faisceaux infrarouges peuvent être réfléchis ou diffusés pour contourner des obstacles. Cependant, cette méthode est moins efficace que la transmission en ligne de vue directe car la qualité du signal peut se dégrader rapidement en cas de réflexion ou de dispersion.

### Applications des faisceaux infrarouges

Les faisceaux infrarouges sont utilisés dans divers domaines en raison de leur capacité à transmettre des données de manière sécurisée et rapide sur des distances courtes. Voici quelques applications clés :

#### 1. Communication de données sans fil

- **Réseaux locaux sans fil (LAN)** : Les faisceaux infrarouges sont utilisés dans des réseaux où une connexion rapide et sécurisée est nécessaire sans nécessiter de câblage. Par exemple, dans les bureaux ou les campus universitaires.

- **Connexions peer-to-peer** : Des dispositifs comme les smartphones ou les ordinateurs portables peuvent échanger des données via des faisceaux infrarouges pour des transferts rapides et sécurisés.

## **2. Systèmes de contrôle à distance**

- Les télécommandes infrarouges sont largement utilisées pour contrôler des appareils domestiques comme les télévisions, les climatiseurs et d'autres équipements électroniques. Ces systèmes sont simples, peu coûteux et efficaces pour des connexions à courte portée.

## **3. Applications industrielles**

- Les faisceaux infrarouges sont utilisés dans des environnements industriels pour le suivi des processus, la gestion des stocks, ou le contrôle des machines. Par exemple, les systèmes de capteurs infrarouges peuvent mesurer des températures et transmettre ces informations sans fil à un récepteur central.