

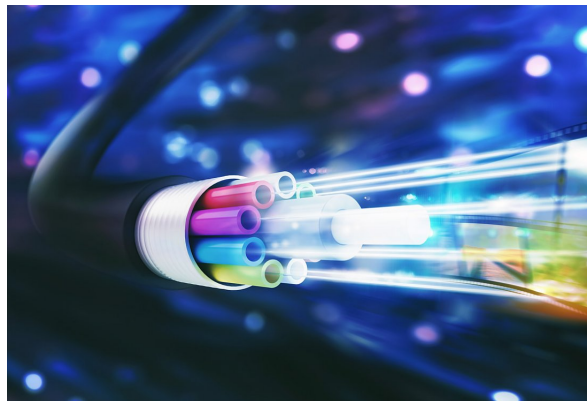
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud MAMMERRI – Tizi-Ouzou

+ . ⊙ . V . : Σ + □ : || : V . + □ . □ . ○  
**U.M.M.T.O**



Faculté de Génie Électrique et Informatique  
Département d'Electronique

# Support de Cours : " Supports de transmission "



au profit des étudiants  
"3<sup>eme</sup> Année Licence 'L3' Télécommunication"

Préparé par :

**Dr. AMIR Mounir**  
MAITRE DE CONFÉRENCE -B-

**2019/2020**

# Avant-propos

Ce support de cours a été rédigé à l'intention des étudiants de troisième année Licence des filières Télécommunications des universités et écoles d'ingénieurs d'Algérie. Il correspond au programme officiel du domaine sciences et technologies de la matière support de transmission. Il regroupe les notions indispensables pour bien comprendre un dispositif nécessaire pour les systèmes de transmission qui est le support qui véhicule l'information. Il présente les caractéristiques des supports de transmission, les différents types, jusqu'aux les domaines d'applications. Connaître ces supports de transmission est une nécessité absolue pour les étudiants en télécommunications.

Le présent manuscrit est constitué de cinq chapitres. Les principales caractéristiques des supports de transmission telles que : Bande passante, atténuation, sensibilité aux bruits, impédance caractéristique, coefficient de réflexion et rapport d'onde stationnaire, sont regroupés au sein du premier chapitre. Viennent ensuite les énonces des paramètres de certains conducteurs électriques les coaxiaux, paires torsadées. Un chapitre entier est consacré à la présentation des fibres optiques et leurs avantages, domaines d'application. Généralités sur les faisceaux hertziens, les principales fréquences et liaisons satellites sont abordées au troisième chapitre. Le dernier chapitre est structuré de façon à faire évoluer progressivement la présentation du phénomène de propagation des faisceaux lumineux en espace libre, depuis la présentation des spectres, sources infrarouge et lumière visible jusqu'à la présentation des différents domaines d'application.

De plus, quelques encarts bibliographiques ou à caractère didactique illustrent certaines applications quotidiennes de la propagation électromagnétique (transmission des données dans les câbles Ethernet, les applications des micro-ondes, communications par fibre optique...).

# Plan pédagogique du Cours

## Fiche technique du cours

**Unité d'enseignement :** UED 3.1

**Matière :** Supports de transmission

**Filière :** Télécommunications

**Niveau :** 3<sup>eme</sup> année Licence

**Volume Horaire :** 22h30 heures (Cours : 1h30)

**Crédits :** 1

**Coefficient :** 1

**Evaluation :** Examen : 100%

## Visées d'apprentissage

- Connaître les principes de base du support de transmission.
- Comprendre le principe de fonctionnement des différents types supports de transmission.

## Prérequis

- Télécommunications fondamentales,
- Télécommunications et applications.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Caractéristiques des supports de transmission</b>	<b>1</b>
I)	Bande passante . . . . .	1
II)	Atténuation . . . . .	2
III)	Sensibilité aux bruits . . . . .	3
1)	Rapport Signal sur Bruit . . . . .	4
2)	Bruit Extérieur . . . . .	4
3)	Bruit interne . . . . .	5
IV)	Impédance caractéristique . . . . .	5
V)	Coefficients de réflexion, de transmission et rapport d'onde stationnaire (TOS) .	6
1)	Coefficients de réflexion . . . . .	6
2)	Rapport d'ondes stationnaires . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Conducteurs électriques</b>	<b>10</b>
I)	Câble Coaxial . . . . .	10
1)	Paramètres primaires . . . . .	11
2)	Paramètres secondaires . . . . .	12
3)	Exemple . . . . .	12
II)	Paires torsadées . . . . .	13
1)	Paramètres primaires . . . . .	13
2)	Paramètres secondaires . . . . .	14
III)	Normes et catégories . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Fibres optiques</b>	<b>17</b>
I)	Caractéristiques . . . . .	17
1)	Propagation . . . . .	17
2)	Fréquence de coupure . . . . .	17
3)	Angle d'ouverture . . . . .	18
4)	Gradient d'indice . . . . .	18
5)	Modes de propagation . . . . .	18
6)	Bande passante . . . . .	19
II)	Types de fibres optiques . . . . .	19
1)	Multimode à saut d'indice . . . . .	19
2)	Monomode . . . . .	19
3)	Multimode à gradient d'indice . . . . .	20
III)	Avantages . . . . .	20
IV)	Domaines d'application de la fibre optique . . . . .	21

1)	Télécommunications . . . . .	21
2)	Médecine . . . . .	21
3)	Capteurs . . . . .	21
4)	Éclairage . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Faisceaux Hertiens</b>	<b>23</b>
I)	Généralités . . . . .	23
II)	Principales fréquences et bandes ou canaux . . . . .	24
III)	Liaisons satellite . . . . .	25
1)	Principe . . . . .	25
2)	Les différents types de satellites . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Faisceaux lumineux (infra-rouge et visible) en espace libre</b>	<b>28</b>
I)	Spectres . . . . .	28
II)	Portées . . . . .	29
III)	Intérêts et limites . . . . .	29
1)	Intérêts . . . . .	29
2)	Limites . . . . .	29
IV)	Sources infra-rouge . . . . .	30
1)	Diode Infrarouge . . . . .	30
V)	Sources de lumière visible . . . . .	31
1)	Diodes électroluminescentes (LED) . . . . .	31
2)	Diode Laser . . . . .	32
VI)	Applications . . . . .	33
1)	Pyrométrie optique . . . . .	34
2)	Thermographie . . . . .	34
3)	Spectroscopie . . . . .	34
4)	Photographie infrarouge . . . . .	34
5)	Chauffage, Séchage et Cuisson . . . . .	34
6)	Transmission en espace libre . . . . .	34
7)	Télécommunications . . . . .	34

# Table des figures

1.1	Bande Passante(BP) . . . . .	1
1.2	Diviseur de tension . . . . .	2
1.3	L'atténuation totale est le produit d'une atténuation individuelle de chaque circuit en cascade. . . . .	3
1.4	Schéma équivalent d'un élément (dx) d'une ligne de transmission . . . . .	6
1.5	Ligne de longueur $l$ et d'impédance $Z_0$ , alimenté par un générateur $G$ et chargé par une impédance $Z_C$ . . . . .	6
2.1	Câble Coaxial . . . . .	10
2.2	Paires torsadées . . . . .	13
3.1	Propagation dans une Fibre . . . . .	18
3.2	Fibre à saut d'indice . . . . .	19
3.3	Fibre monomode . . . . .	20
3.4	Fibre à gradient d'indice . . . . .	20
4.1	Liaisons hertzien . . . . .	24
4.2	Principe d'une liaison satellitaire . . . . .	25
5.1	Place du spectre des lumières infrarouge et visible . . . . .	28
5.2	Symbole d'une diode infrarouge . . . . .	30
5.3	Courbe de l'intensité énergétique en fonction du courant . . . . .	30
5.4	Spectre d'émission d'une diode infrarouge . . . . .	31
5.5	Diodes électroluminescentes . . . . .	31
5.6	Caractéristiques d'une diode électroluminescente . . . . .	32
5.7	Diagramme des bandes d'énergie en émission stimulée . . . . .	33

# Chapitre 1

## Caractéristiques des supports de transmission

### I) Bande passante

La bande passante (BP)(Bandwidth (BW)) est la partie du spectre électromagnétique occupée par un signal. C'est aussi la gamme de fréquence sur laquelle fonctionne un récepteur ou un autre circuit électronique. Plus spécifiquement, la largeur de la bande est la différence entre les limites de fréquence supérieure et inférieure du signal ou de la plage de fonctionnement de l'équipement. La figure 1.1 montre la largeur de bande de la gamme de fréquence vocale de 300 à 3000 Hz. La fréquence supérieure est  $f_2$  et la fréquence inférieure est  $f_1$ . La bande passante, alors, est :

$$BP = f_2 - f_1$$

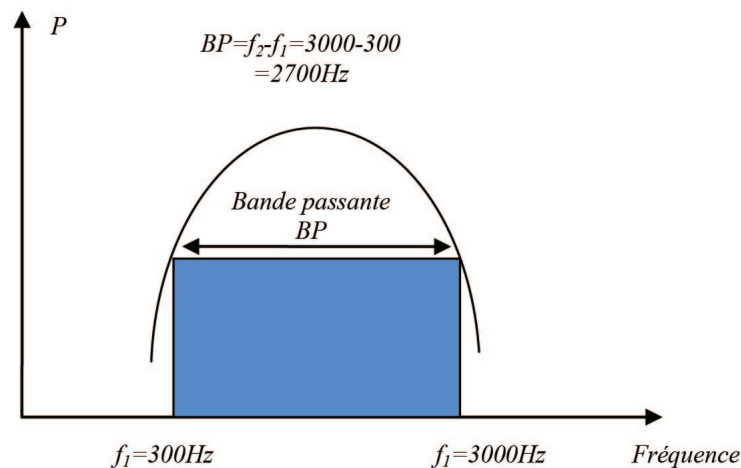


FIGURE 1.1 – Bande Passante(BP)

## Exemple 1

La gamme de fréquences couramment utilisée est de 902 à 928 Mhz. Quelle est la largeur de cette bande ?

$$f_1 = 902\text{MHz} \text{ et } f_2 = 928\text{MHz}$$
$$BP = f_2 - f_1 = 928 - 902 = 26\text{MHz}$$

## Exemple 2

Un signal de télévision occupe une bande passante de 6 Mhz. Si la limite de basse fréquence du canal est 54 Mhz, quelle est la limite supérieure de la fréquence ?

$$f_1 = 54\text{MHz} \text{ et } BP = 6\text{MHz}$$
$$BP = f_2 - f_1 \Rightarrow f_2 = BP + f_1 = 60\text{MHz}$$

## II) Atténuation

L'atténuation fait référence à une perte introduite par un circuit ou un composant. De nombreux circuits électroniques, parfois appelés étages, réduisent l'amplitude d'un signal plutôt que de l'augmenter. Si l'amplitude du signal de sortie est inférieure à l'entrée, le circuit présente une perte ou une atténuation. L'atténuation est simplement le rapport de la sortie à l'entrée. La lettre A est utilisée pour représenter l'atténuation ainsi que le gain :

$$A = \frac{\text{Signal de sortie}}{\text{Signal d'entrée}} = \frac{V_s}{V_e}$$

Les circuits qui introduisent l'atténuation ont un gain inférieur à 1. En d'autres termes, la sortie est une fraction de l'entrée.

Un diviseur de tension est un exemple de circuit simple avec atténuation tel que montré sur la figure 1.2. La tension de sortie est la tension d'entrée multipliée par un rapport basé sur les valeurs des résistances. Avec les valeurs de résistance indiquées, le facteur de gain ou d'atténuation du circuit est  $A = R_2 / (R_1 + R_2) = 100 / (200 + 100) = 100 / 300 = 0.3333$ . Si un signal de 10 V est appliqué à l'atténuateur, la sortie est  $V_s = V_{in} \times A = 10(0.3333) = 3.333\text{V}$ .

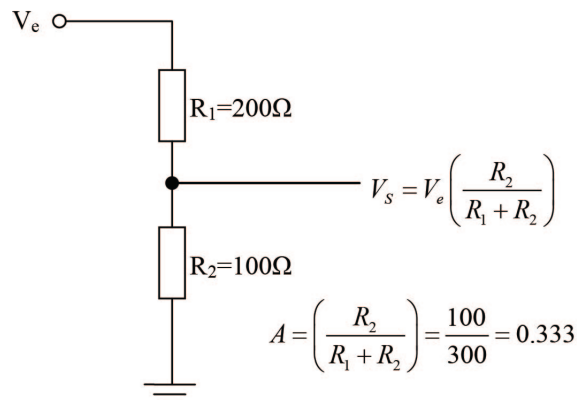


FIGURE 1.2 – Diviseur de tension

Lorsque plusieurs circuits avec atténuation sont en cascade, l'atténuation totale est, encore une fois, le produit des atténuations individuelles. Le circuit de la figure 1.3 en est un exemple. Les facteurs d'atténuation pour chaque circuit sont montrés. L'atténuation globale est :

$$A_T = A_1 \times A_2 \times A_3$$

Avec les valeurs indiquées dans la figure 1.3, l'atténuation globale est

$$A_T = 0.2 \times 0.9 \times 0.06 = 0.0108$$

Avec une entrée de 3 V, la tension de sortie est

$$V_S = A_T \times V_e = 0.0108(3) = 0.0324 = 32.4mV$$

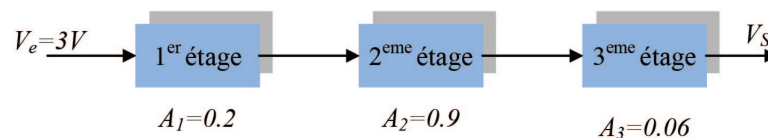


FIGURE 1.3 – L'atténuation totale est le produit d'une atténuation individuelle de chaque circuit en cascade.

### III) Sensibilité aux bruits

Le bruit est un signal électronique qui est un mélange de nombreuses fréquences aléatoires à de nombreuses amplitudes qui s'ajoute à un signal radio ou d'information lorsqu'il est transmis d'un endroit à un autre ou lorsqu'il est traité. Le bruit ne représente pas la même chose que les interférences provenant d'autres signaux d'information.

Lorsque vous allumez un récepteur AM, FM ou ondes courtes et que vous l'accordez à une certaine position entre les stations, le sifflement ou la statique que vous entendez dans le haut-parleur est du bruit. Le bruit apparaît également sur un écran de télévision noir et blanc comme neige ou sur un écran couleur comme confettis. Si le niveau de bruit est suffisamment élevé et/ou si le signal est suffisamment faible, le bruit peut complètement effacer le signal d'origine. Le bruit qui se produit lors de la transmission de données numériques provoque des erreurs de bit et peut entraîner des erreurs de brouillage ou de perte d'information.

Le niveau de bruit dans un système est proportionnel à la température et à la largeur de bande, à la quantité de courant  $I$  due dans un composant, au gain du circuit, et à la résistance du circuit. L'augmentation de ces facteurs augmente le bruit. Par conséquent, il est préférable d'obtenir un faible bruit en utilisant des circuits : à faible gain, à faible courant continu, avec valeurs de faible résistance et des largeurs de bande étroites. Garder la température basse peut également aider.

Le bruit est un problème dans les systèmes de communication lorsque les signaux reçus sont de très faible amplitude. Lorsque la transmission se fait sur de courtes distances ou qu'on utilise des émetteurs à haute puissance, le bruit n'est généralement pas un problème. Mais dans la plupart des systèmes de communication, les signaux faibles sont normaux et le bruit doit être

pris en compte au stade de la conception. C'est dans le récepteur que le bruit est le plus nuisible parce que le récepteur doit amplifier le signal faible et récupérer l'information de façon fiable.

Le bruit peut être extérieur au récepteur ou provenir du récepteur lui-même. Les deux types se trouvent dans tous les récepteurs, et les deux affectent le SNR (Signal-to-Noise Ratio).

## 1) Rapport Signal sur Bruit

Le rapport signal-bruit (S/N), également désigné SNR, indique les forces relatives du signal et le bruit dans un système de communication. Plus le signal est fort et plus le bruit est faible, plus le rapport S/N est élevé. Si le signal est faible et que le bruit est fort, le rapport S/N sera faible et la réception sera peu fiable. L'équipement de communication est conçu pour produire le rapport S/N le plus élevé possible.

Les signaux peuvent être exprimés en termes de tension ou de puissance. Le rapport S/N est calculé en utilisant les valeurs de tension ou de puissance :

$$\frac{S}{N} = \frac{V_S}{V_n} \text{ ou } \frac{S}{N} = \frac{P_S}{P_n}$$

avec :

$V_S$  : la tension du signal,  $V_n$  : la tension du bruit,  $P_S$  : puissance du signal et  $P_n$  : puissance du bruit

## 2) Bruit Extérieur

Le bruit extérieur provient de sources sur lesquelles nous avons peu ou pas de contrôle comme les sources industriel, atmosphérique, ou l'espace. Quelle que soit sa source, le bruit apparaît sous forme de tension aléatoire et peut être vu sur un oscilloscope. L'amplitude varie sur une large gamme, comme le fait la fréquence. On peut dire que le bruit en général contient toutes les fréquences, variant aléatoirement. C'est ce qu'on appelle généralement le bruit blanc. Le bruit atmosphérique et le bruit spatial sont une réalité et ne peuvent tout simplement pas être éliminés. Un certain bruit industriel peut être contrôlé à la source, mais parce qu'il y a tellement de sources de ce type de bruit, il n'y a aucun moyen de l'éliminer. La clé d'une communication fiable est donc simplement de générer des signaux à une puissance suffisante pour surmonter le bruit externe. Dans certains cas, le blindage de circuits sensibles dans des enceintes métalliques peut aider à contrôler le bruit.

### Bruit industriel

Il est produit par des équipements manufacturés, comme des systèmes d'allumage automobile, des moteurs électriques et des génératrices. Tout équipement électrique qui fait passer des tensions ou des courants élevés produit des transitoires qui créent du bruit.

### Bruit atmosphérique

Les perturbations électriques qui se produisent naturellement dans l'atmosphère terrestre sont une autre source de bruit. Le bruit atmosphérique est souvent appelé statique. Les charges statique proviennent généralement de la foudre, les décharges électriques qui se produisent entre les nuages ou entre la terre et les nuages.

## **Bruit extraterrestre**

Le bruit extraterrestre, solaire et cosmique, provient de sources dans l'espace. L'une des principales sources de bruit extraterrestre est le soleil, qui émet une large gamme de signaux dans un large spectre de bruit. L'intensité du bruit produit par le soleil varie avec le temps. En fait, le soleil a un cycle de bruit répétable de 11 ans.

## **3) Bruit interne**

Les composants électroniques d'un récepteur comme les résistances, les diodes et les transistors sont les principales sources de bruit interne. Le bruit interne, bien qu'il soit de faible niveau, est souvent assez grand pour interférer avec les signaux faibles. Les principales sources de bruit interne dans un récepteur sont le bruit thermique, le bruit semi-conducteur et la distorsion d'intermodulation. Puisque les sources de bruit interne sont bien connues, il existe un certain contrôle de conception sur ce type de bruit.

### **Bruit thermique**

La plupart des bruits internes sont causés par un phénomène connu sous le nom d'agitation thermique, le mouvement aléatoire des électrons libres dans un conducteur causé par la chaleur. L'augmentation de la température fait augmenter ce mouvement atomique. Comme les composants sont des conducteurs, le mouvement des électrons constitue un flux de courant qui produit une petite tension à travers ce composant. Les électrons traversant un conducteur comme flux de courant connaissent des obstacles passagers dans leur chemin comme ils rencontrent les atomes agités thermiquement. La résistance apparente du conducteur fluctue donc, provoquant la tension aléatoire produite thermiquement que nous appelons bruit.

### **Bruit semi-conducteur**

Les composants électroniques tels que les diodes et les transistors sont les principaux contributeurs du bruit. En plus du bruit thermique, les semi-conducteurs produisent du bruit de grenaille, du bruit de transit et du bruit de scintillement.

### **Distorsion d'intermodulation**

La distorsion d'intermodulation résulte de la génération de nouveaux signaux et harmoniques causés par des non-linéarités de circuits. Comme indiqué précédemment, les circuits ne peuvent jamais être parfaitement linéaires, et si les tensions de polarisation sont incorrectes dans un amplificateur ou si elles sont entraînées dans le découpage, elles risquent d'être plus non linéaires que prévu.

## **IV) Impédance caractéristique**

Une ligne de transmission est constituée de 2 conducteurs de cuivre séparés par un isolant. La figure 1.4 modélise un élément d'une ligne en matérialisant ses composantes physiques. Elle présente au courant électrique un effet résistif (R) responsable de l'atténuation du signal, des effets réactifs qui se décomposent en effet selfique (L) et en effet capacitif (C), et enfin la

conductance (G) qui exprime la perte par effet résistif entre les deux conducteurs (généralement négligeable).

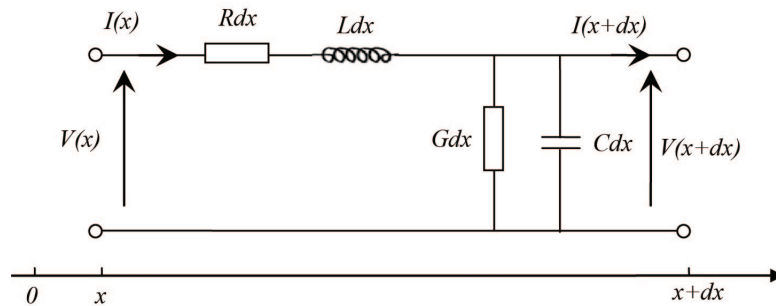


FIGURE 1.4 – Schéma équivalent d'un élément ( $dx$ ) d'une ligne de transmission

On appelle impédance ( $Z_0$ ) de l'élément de ligne de longueur  $dx$ , le rapport  $dV/dI$ . La notion d'impédance en courant alternatif recouvre une notion similaire à celle de résistance en courant continu, elle s'exprime en ohm ( $\Omega$ ). Le rapport  $dV/dI$  pour une ligne supposée de longueur infinie s'appelle impédance caractéristique notée  $Z_0$  :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$$

## V) Coefficients de réflexion, de transmission et rapport d'onde stationnaire (TOS)

### 1) Coefficients de réflexion

Nous allons supposer que les valeurs connues sont la tension et le courant en bout de la ligne, côté charge. Soit une ligne de longueur  $l$ , d'impédance caractéristique  $Z_0$ , alimentée par un générateur de f.e.m. instantanée  $e = E_0 \cos t$ , terminée sur une impédance  $Z_c$  (figure 1.5). l'onde électrique en un point quelconque d'une telle ligne résultait de la superposition d'une onde incidente et d'une autre réfléchie sur le récepteur.

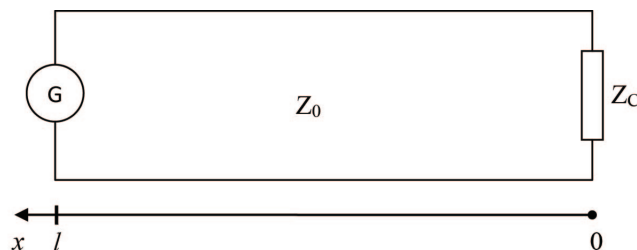


FIGURE 1.5 – Ligne de longueur  $l$  et d'impédance  $Z_0$ , alimenté par un générateur  $G$  et chargé par une impédance  $Z_c$

On va prendre l'origine de l'axe des abscisses au récepteur et orienté du récepteur vers le générateur, on obtient :

$$\frac{\partial V}{\partial x} = (R + jL\omega)I$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = (G + jC\omega)V$$

Nous aurons toujours :

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \gamma^2 I$$

et  $\frac{\partial I}{\partial x} = \gamma^2 V$  dont les solutions générales devront être écrites ici :

$$V(x) = V_i e^{\gamma x} + V_r e^{-\gamma x}$$

$$I(x) = I_i e^{\gamma x} + I_r e^{-\gamma x}$$

A partir de ces équations, on démontre que l'on a toujours :

$$\frac{V_i}{I_i} = -\frac{V_r}{I_r} = Z_0$$

Soient  $V_C$  et  $I_C$  les tension et courant a la charge  $Z_C$ , nous avons ici :

$$V_i = \frac{V_C + Z_0 I_C}{2}$$

$$V_r = \frac{V_C - Z_0 I_C}{2}$$

le coefficient de réflexion en un point d'abscisse  $x$  quelconque est défini comme le rapport de l'amplitude de l'onde réfléchie à l'amplitude de l'onde incidente en ce point :

$$\Gamma(x) = \frac{V_r e^{-\gamma x}}{V_i e^{\gamma x}} = \frac{V_r}{V_i} e^{-2\gamma x}$$

$$\frac{V_r}{V_i} = \frac{V_C - Z_0 I_C}{V_C + Z_0 I_C} = \frac{Z_C - Z_0}{Z_C + Z_0}$$

il devient :  $\Gamma(x) = \frac{Z_C - Z_0}{Z_C + Z_0} e^{-2\gamma x}$  pour  $x = 0$ , c'est-à-dire sur le récepteur, nous obtenons :

$$\Gamma_R = \frac{Z_C - Z_0}{Z_C + Z_0}$$

Il y a deux valeurs particulièrement intéressantes du module du coefficient de réflexion. ce sont  $\Gamma_c = 0$  et  $\Gamma_c = 1$

- La première valeur se produit lorsque  $Z_C = Z_0$ . Il n'y a pas d'onde réfléchie.
- la deuxième valeur se produit dans les trois cas suivants :  $Z_C = 0$  ;  $Z_C = \infty$  ;  $|Z_C - Z_0| = |Z_C + Z_0|$  dans chacun de ces cas, il s'établit sur la ligne un régime d'ondes stationnaires pures.

## 2) Rapport d'ondes stationnaires

Nous avons vu que selon la valeur de la charge  $Z_C$ , la ligne est parcourue par une onde incidente et une onde réfléchie ce qui se traduit par un régime d'onde stationnaire (avec la présence de maxima et de minima de tension). Quand l'onde incidente n'est pas réfléchie par la charge une simple onde progressive se propage sur la ligne et la tension ne possède pas d'extremum. Nous allons définir un coefficient qui devra traduire cet état de fait.

La quantité  $V_{\max}/V_{\min} = I_{\max}/I_{\min} = \rho$  est appelée "Rapport d'ondes Stationnaires ou R.O.S.(Voltage Standing Waves Ration V.S.W.R.)". Elle est liée au module du coefficient de réflexion de la charge :

$$ROS = \rho = \frac{1 + \Gamma_C}{1 - \Gamma_C}$$

Lorsque  $\rho$  est au voisinage de 1, on peut dire que le régime qui est établi sur la ligne étudiée est proche du régime d'ondes progressives. Dès que  $\rho$  vaut quelques unités, c'est qu'il y a une désadaptation ligne - charge assez sérieuse. Enfin pour des valeurs supérieures à 10 on peut dire que le régime sur ligne est stationnaires.

Le TOS et le ROS sont erronément confondus car ils n'ont pas la même définition bien que celles-ci soient liées mathématiquement

$$TOS = \frac{(ROS - 1)}{ROS + 1} \times 100$$

## EXERCICES

1. Quelle est l'atténuation d'un diviseur de tension comme celui de la Fig.1.2, où la valeur de  $R_1$  est  $3,3k\Omega$  et celle de  $R_2$  est  $5,1k\Omega$  ?
2. Trois amplificateurs en cascade avec des gains de 15, 22 et 7 ; la tension d'entrée est de 120. Quels sont le gain global et les tensions de sortie de chaque étage ?
3. Une pièce d'équipement de communication a deux étages d'amplification avec des gains de 40 et 60 et deux étages d'atténuation avec des facteurs d'atténuation de 0,03 et 0,075. La tension de sortie est de 2,2 V. Quel est le gain global (ou l'atténuation) et quelle est la tension d'entrée ?
4. Nommez les cinq principaux types de bruit interne qui se produisent dans un récepteur.
5. Quelle est la source principale de bruit atmosphérique ?
6. citez quatre sources courantes de bruit industriel.
7. Quelle est la source principale de bruit interne dans un récepteur ?
8. Dans quelles unités le rapport signal/bruit (S/N) est-il exprimé ?
9. Comment l'augmentation de la température d'un composant affecte-t-elle sa puissance bruit ?
10. Quel est le nom de la distance qu'un signal parcourt au cours d'un cycle ?
11. Décrire le circuit équivalent d'une ligne de transmission.
12. Qu'est-ce qui détermine l'impédance caractéristique d'une ligne de transmission ?

13. Décrire ce qui se passe si une ligne de transmission n'est pas raccordée à son impédance caractéristique.
14. Quel est l'effet sur la puissance transmise lorsque les impédances de charge et de ligne de transmission ne correspondent pas ?
15. comment on appelle le rapport de la tension réfléchie à la tension incidente sur une ligne de transport ?
16. Un câble coaxial d'impédance  $52\Omega$  chargé par une antenne de avec une impédance  $36\Omega$ . Qu'est la valeur du SWR ?
17. La tension maximale le long d'une ligne de transport est de  $170V$  et la tension minimale est de  $80V$ . Calculer le TOS et le coefficient de réflexion.
18. Le coefficient de réflexion d'une ligne de transmission est de  $0,75$ . Qu'elle est la valeur du SWR.
19. Quel est le coefficient de réflexion et le TOS d'une ligne de transport ouverte ou à court-circuit ?

# Chapitre 2

## Conducteurs électriques

Nous avons vu au chapitre précédant l'importance et le rôle des paramètres dits primaires  $R$ ,  $L$ ,  $G$  et  $C$  dans la modélisation d'une ligne. La détermination de  $L$  et  $C$  peut être effectuée à partir des lois fondamentales de l'électromagnétisme.

Pour  $R$  et  $G$ , on doit tenir compte des phénomènes liés aux hautes fréquences H.F., pour  $R$  il s'agit de la localisation superficielle des courants dans les conducteurs (effet de peau) et pour  $G$  des pertes de nature conductrice dans le diélectrique.

### I) Câble Coaxial

Un câble coaxial est constitué de deux conducteurs cylindriques sur un même axe, séparés par un isolant (Téflon, polythène, polypropylène, air,...), l'impédance sera faible, et aux fréquences élevées, il se comporte comme un guide d'onde. Les câbles coaxiaux ne doivent pas être confondus avec les câbles blindés dont le blindage ne sert qu'à protéger le ou les conducteurs centraux des perturbations extérieures.

Soient  $d_1$  le diamètre du conducteur intérieur de conductivité  $\sigma_1$ ,  $d_2$  le diamètre intérieur du conducteur extérieur de conductivité  $\sigma_2$ ,  $\epsilon_r$  la constante diélectrique relative et  $tg\delta$  le facteur de pertes du diélectrique

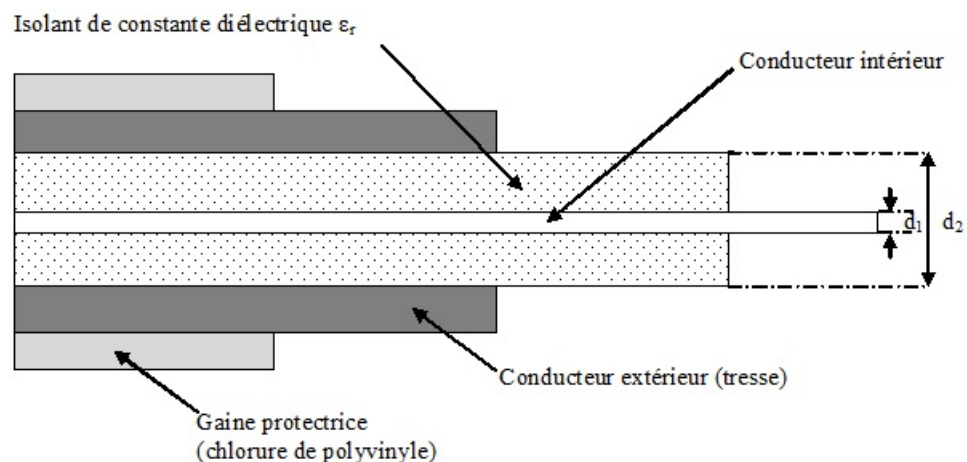


FIGURE 2.1 – Câble Coaxial

## 1) Paramètres primaires

Les valeurs par unité de longueur de la résistance, de l'inductance, de la conductance et de la capacité sont respectivement :

### Résistance

En H.F. :

$$R = \sqrt{\frac{\mu_0 f}{\pi}} \left( \frac{1}{d_1 \sqrt{\rho_1}} + \frac{1}{d_2 \sqrt{\rho_2}} \right)$$

si  $\rho_1 = \rho_2$

$$R = \frac{\sqrt{\rho f}}{1580} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)$$

### Inductance

D'après le théorème d'Ampère, le flux en un point p intérieur du câble est  $\Phi = L * I$  et le flux calculer par rapport a un élément  $dx$  est :  $d\Phi = \left( \frac{\mu I}{2\pi x} \right) dx$

On intègre de  $d_1$  à  $d_2$  :

$$\Phi = \int_{d_1}^{d_2} d\Phi = \frac{\mu I}{2\pi} \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right)$$

d'ou

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right)$$

avec :  $\mu = \mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right)$$

### Capacité

D'après le théorème de Gauss, le champ électrique en un point p intérieur au câble est  $E = \frac{q}{2\pi x \epsilon}$  on intègre de  $d_1$  à  $d_2$

$$U = \int_{d_1}^{d_2} E dx = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right)$$

avec :  $C = \frac{q}{U} = \frac{2\pi \epsilon}{\ln(d_2/d_1)}$

Dans l'isolant on a :  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$  avec  $\epsilon_0 = 1/(36\pi 10^9)$

donc :

$$C = \frac{\epsilon_r}{18.10^9 \ln(d_2/d_1)}$$

### Conductance

En général on mesure  $tg\delta = G/C\omega$   
d'où on peut tirer  $G = C\omega.tg\delta$

## 2) Paramètres secondaires

### Impédance

Les pertes sont très faibles, on a donc :  $Z_0 = \sqrt{L/C}$

$$Z_0 = \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$$

### Vitesse de propagation

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$
$$v = \frac{3.10^8}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

### Atténuation

Avec de faibles pertes on a :

$$\alpha = \omega\sqrt{LC} \left( \frac{R}{2L\omega} + \frac{G}{2C\omega} \right) = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\alpha = \frac{R}{2Z_0} + \frac{GZ_0}{2}$$

## 3) Exemple

Soit le câble coaxial de type RG58 est utilisé dans les réseaux Ethernet , ce câble est caractérisé par une résistivité  $\rho = 1,610^{-8}\Omega.m$ ,  $D_1 = 0,82$ ,  $D_2 = 2,95mm$  et un diélectrique polyéthylène dont  $\epsilon_r = 2,3$ .

Calculer les paramètres de ce câble pour les fréquences 10MHz et 200MHz.

## Solution

Paramètres constants :

$$d_2/d_1 = 3,6 \text{ (idéal)}$$

$$C = \frac{\epsilon_r}{18.10^9 \ln(d_2/d_1)} = 99.7 \text{ pF/m}$$

$$L = 2.10^{-7} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 0.256 \text{ m}$$

$$Z_C = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 50.6 \Omega$$

$$v = \frac{3.10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} = 2.10^8 \text{ m/s}$$

Pour la fréquence  $f=10$  MHz :

$$R = \frac{\sqrt{\rho f}}{1580} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right) = 0.38 \Omega/m$$

$$\alpha = \frac{R}{2Z_0} 2 = 3,79.10^{-3} \text{ np/m d'ou } Att = 0.033 \text{ dB/m}$$

Pour la fréquence  $f=200$  MHz :

$$R = \frac{\sqrt{\rho f}}{1580} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right) = 0.38 \Omega/m$$

$$\alpha = \frac{R}{2Z_0} 2 = 17,4.10^{-3} \text{ np/m d'ou } Att = 0.015 \text{ dB/m}$$

## II) Paires torsadées

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

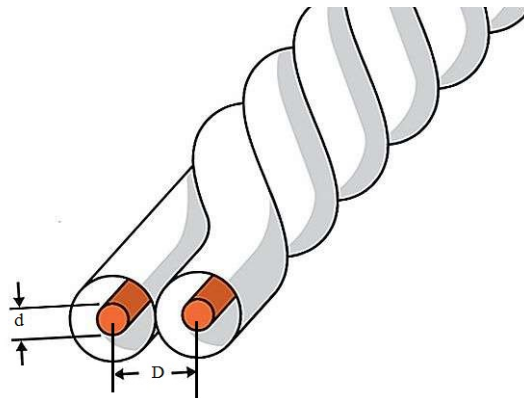


FIGURE 2.2 – Paires torsadées

### 1) Paramètres primaires

Les valeurs par unité de longueur de la résistance, de l'inductance, de la capacité et de la conductance sont déterminées par les équations suivantes :

## Résistance

R : dépend du diamètre des conducteurs et de la fréquence  
En Basse Fréquence (B.F.) :

$$R = 2 \frac{\rho}{s} = 2 \frac{\rho}{\pi r^2}$$

Où  $\rho$  la résistivité et  $r$  le rayon du conducteur

En Haute Fréquence (H.F.) : on doit tenir compte l'effet de peau,  $s \approx 2\pi r \delta$  avec  $\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$

$$R = 2 \frac{\rho}{s} = 2 \frac{\sqrt{\rho f}}{1580 \times D}$$

## Inductance

L décroît très légèrement avec la fréquence.  
A l'aide du théorème d'Ampère on peut calculer :  
D = écart entre des axes des conducteurs,  $r$  = rayon,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$   
en continu ou en B.F.

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( 1 + 4 \ln \frac{D}{r} \right) \Rightarrow L = 10^{-7} \left( 1 + 4 \ln \frac{D}{r} \right)$$

en H.F., le courant est en surface (flux intérieur nul)

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \left( \frac{D}{r} - 1 \right) \Rightarrow L = 4 \cdot 10^{-7} \ln \left( \frac{D}{r} - 1 \right) (H/m)$$

## Capacité

C dépend des isolants et de l'écart entre les conducteurs (quelques pF/m).  
A l'aide du théorème de Gauss on calcule :  
D = écart entre des axes des conducteurs,  $r$  = rayon,  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ,  $\epsilon_0 = 1/36\pi 10^9$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/r)^2} = \frac{\pi\epsilon}{\ln(D/r)}$$

$$C = \frac{\epsilon_r}{36 \cdot 10^9 \ln(D/r)} (F/m)$$

## Conductance

G sera toujours négligeable.

$$G = 2\pi^2 \frac{\epsilon \cdot f \cdot t g \delta}{\ln(D/r)} = 0.175 \cdot 10^{-9} \frac{\epsilon_r \cdot f \cdot t g \delta}{\ln(D/r)} (S/m)$$

## 2) Paramètres secondaires

Les paramètres secondaires peuvent dépendre de la fréquence .

## Atténuation

Dans les paires bifilaires, les pertes sont élevées, essentiellement par effet joules (dans R).

en B.F.,  $R \gg L\omega$  donc :  $\alpha = \sqrt{\frac{RC\omega}{2}}$  (Np/m)

en H.F.,  $R \ll L\omega$  d'où  $\alpha = \frac{R}{2} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$  (Np/m)

## Impédance

L'impédance d'une paire torsadée, d'environ 600  $\Omega$  en B.F. descend rapidement vers une constante de l'ordre de 100  $\Omega$  lorsque la fréquence augmente.

En B.F. :  $Z_0 = \sqrt{\frac{R}{2C\omega}}(1 - j)$  En H.F. :  $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = Cte$

## Vitesse de propagation

La vitesse de propagation passe rapidement d'environ 0,5 à  $2 \cdot 10^8$  m/s.

En B.F. :  $\beta = \sqrt{\frac{RC\omega}{2}}$  donc :  $v = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2\omega}{RC}}$

En H.F. :  $\beta = \omega\sqrt{LC}$  donc :  $v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = cte$

## Exemple

Calculer les caractéristiques pour les câbles suivants :

- Câble téléphonique quatre paires fabriqué par des files cuivre monobrin de  $d = 0.5mm$ , un isolant PVC ( $\epsilon_r = 5$ ) à la fréquence 1MHz.
- Câble CAT5 construit par un fil de cuivre monobrin  $d = 0.51mm$ , isolant polyoléfine ( $\epsilon_r = 2.35$ ), un écart  $d = 1.04mm$ , à la fréquence 100MHz.

## III) Normes et catégories

Dans des domaines techniques comme les réseaux et les télécommunications, la normalisation est indispensable, elle répond aussi bien aux attentes des consommateurs qu'aux besoins des fabricants.

Ils existe des différents organismes de normalisation édictent des avis qui couvrent tous les aspects d'un équipement : aspects électriques, mécaniques, connectique... Les principaux organismes internationaux de normalisation regroupent des représentants des industriels, des administrations, des utilisateurs : l'ISO (pour International Organisation for Standardization) et l'ITU (International Telecommunications Union).

Pour crée une norme il faut passer par plusieurs étapes : premièrement le résultat des compromis entre les différentes parties s'exprime dans un document brouillon appelé '*draft*'; par la suite une forme stable est publiée sous forme de *draft proposal*. Puis une version du document quasiment définitive est communiquée, elle constitue une base de travail pour les industriels cette version est appelée '*Draft International Standard*'. Enfin, l'IS (*International Standard*) est la forme définitive. L'organisme considéré publie cette dernière, en utilisant une référence qui dépend de son domaine d'application.

Les supports de transmission sont gérés par la norme ISO/CEI 11801 elle spécifie les recommandations en matière de systèmes de câblage de télécommunication. Cette norme possède un champ d'application très large comme la téléphonie analogique, différents standards de communication de données, systèmes de contrôle et de gestion technique du bâtiment, automatisation de production. Il couvre à la fois le câblage cuivré et en fibre optique. Parmi les supports qui sont gérés par cette norme on trouve :

- UTP** : 'Unshielded Twisted Pairs' Non blindé, utilisé dans les installations non sensibles.
- FTP** : 'Foiled Twisted Pairs' Ecranté (avec feuille d'aluminium) le plus utilisé actuellement en lien permanent dans une installation.
- SFTP** : 'Shielded Twisted Pairs' Blindé (avec tresse de masse et feuille d'aluminium) utilisé dans les installation proches des courants forts.
- SSTP** : 'Shielded Shielded Twisted Pairs' Chaque paire est blindée séparément et le tout est blindé à son tour, utilisé pour les installations en environnement très difficile ou avec des fréquences de travail très élevées (CAT 6 et plus).

## EXERCICES

### Exercice 1

L'impédance caractéristique d'une ligne à faible pertes est donnée par :

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \left( 1 - j\frac{R}{L\omega} + j\frac{G}{2C\omega} \right)$$

Soit une ligne coaxial utilisée à 100MHz pour laquelle :  $d_2 = 1\text{cm}$ ,  $d_2/d_1 = 3.6$ ,  $\sigma_1 = \sigma_2 = 5.8 \cdot 10^7 \text{S/m}$ ,  $\epsilon_r = 2.25$  et  $\text{tg}\delta = 10^{-3}$

- 1) Démontrer que les termes en  $R/2L\omega$  et  $G/2C\omega$  peuvent être négligés.
- 2) Établir, dans ces conditions, l'expression de  $Z_C$  et calculer sa valeur numérique

### Exercice 2

Démontrer les formules de  $R$ ,  $C$ ,  $L$  et  $G$  en donnant les paramètres primaires d'une ligne coaxiale, en appliquant les lois fondamentales de l'électromagnétisme.

On notera  $r_1$  et  $r_2$  ( $d_1$  et  $d_2$ ) les rayons (diamètre) des conducteurs intérieur et extérieur.

# Chapitre 3

## Fibres optiques

### I) Caractéristiques

#### 1) Propagation

La lumière est une onde électromagnétique que l'on définit habituellement par sa longueur d'onde dans le vide. La lumière visible va de 0,4 (violet) à 0,7 (rouge). Les infrarouges sont utilisés dans les fibres optiques ( $0,85\mu$  ;  $1,3\mu$  et  $1,5$  principalement). La fréquence de la porteuse est donc très élevée ( $f = c/\lambda$ ) et une modulation de plusieurs GHz est donc négligeable, l'atténuation d'une fibre optique sera donc indépendante de cette modulation.

Un faisceau de lumière, au passage d'un milieu 1 vers un milieu 2, est réfléchi et est réfracté avec une déviation. L'indice de réfraction  $n$  mesure le rapport entre la vitesse de propagation du rayon lumineux dans le vide et celle dans le milieu considéré, soit :

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

où  $C$  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.

Quelques indices absolus :

vide :	$n_0 = 1$
air :	$n = 1,000293$
verre :	$n = 1,5$ à $1,8$
PMMA :	$n = 1,50$ (Polyméthylmétacrylate)
eau :	$n = 1,33$

#### 2) Fréquence de coupure

Lorsque la lumière pénètre dans une fibre, il faut que la fréquence de celle-ci soit supérieure à une fréquence de coupure déterminée par le diamètre de la fibre. En pratique, le diamètre de la fibre ne doit pas être inférieur à la longueur d'onde à transmettre.

$$F_c = \frac{0,23 \cdot 10^9}{d \sqrt{\epsilon_2 - \epsilon_1}} \text{ d'où on déduit } \lambda_c = \frac{C}{F_c} = 1,3d \sqrt{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

**Exemple :** fibre de silice ( $d = 50\mu m$  et  $\epsilon_2 = 2,25$ )  
 $\lambda_c = 1,350 \cdot 10^{-6} \sqrt{(2,25 - 1)} = 73\mu m$

### 3) Angle d'ouverture

A l'extrémité d'une fibre ( $n_0$ ), un rayon est réfracté dans le cœur ( $n_1$ ) puis indéfiniment réfléchi sur la gaine ( $n_2$ ). On a  $n_0 < n_2 < n_1$

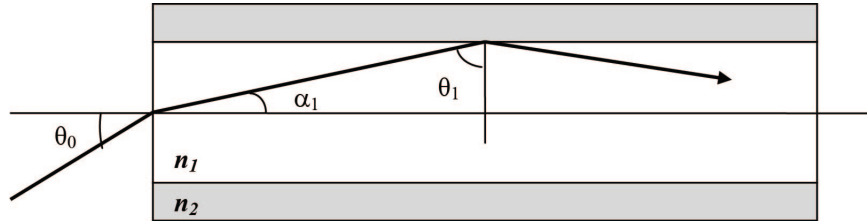


FIGURE 3.1 – Propagation dans une Fibre

On appelle ouverture numérique (ON) d'une fibre, l'angle maximum  $\theta_0$  du rayon incident. selon la loi de Descartes on a :

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \alpha_1$$

dans le triangle rectangle on a :

$$\sin \alpha_1 = \cos \theta_1$$

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \cos \theta_1 = n_1 \sqrt{\cos^2 \theta_1} = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}$$

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = n_1 \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

on considère  $n_0 = 1$  (l'air) donc :  $ON = \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

### 4) Gradient d'indice

Dans ce type de fibres, l'indice du cœur rejoint progressivement celui de la gaine selon un coefficient  $\alpha$  ( $\alpha = 2$  pour un gradient parabolique et  $\alpha = \infty$  pour un saut d'indice). L'ouverture numérique sera maximum au centre de la fibre et nulle près de la gaine.

$$ON_{\max} = n_1 \sqrt{2 \cdot (n_1 - n_2)}$$

### 5) Modes de propagation

Un mode est un angle du rayon lumineux par rapport à l'axe de propagation de la fibre. Le nombre de modes est le nombre d'angles admissibles.

$$M = \frac{v^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 2} \text{ avec } v = ON \cdot 2\pi \frac{d}{\lambda}$$

## 6) Bande passante

La fibre optique est un passe bas, la bande passante (à  $\sim 3dB$ ) est égale à la fréquence de coupure haute et dépend de la dispersion totale. La dispersion étant proportionnelle à la longueur de la fibre, la bande passante diminuera donc avec cette longueur.

$$F_{WB} = 0.44/\sigma_{tot}$$

avec :  $\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_m^2}$

$\sigma_c$  dispersion chromatique,  $\sigma_m$  dispersion modale. Le temps de montée est défini par :

$$T_r = 0.35/F_{WB}$$

## II) Types de fibres optiques

### 1) Multimode à saut d'indice

La version la plus répandue est la fibre à saut d'indice, dans laquelle l'indice de réfraction reste constant dans le cœur et varie de manière abrupte lorsqu'on passe du cœur à la gaine. Les fibres à saut d'indice se divisent elles-mêmes en deux catégories : les fibres à saut d'indice multimodes sont utilisées principalement pour des transmissions à courtes distances, de l'ordre de quelques mètres jusqu'à une centaine de kilomètres.

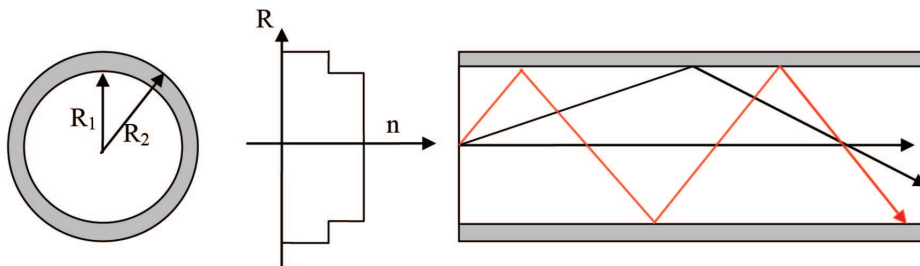


FIGURE 3.2 – Fibre à saut d'indice

### 2) Monomode

La deuxième catégorie des fibres à saut d'indice est la fibre monomode, que l'on utilise pour les communications à longue distance, de l'ordre d'une centaine de kilomètres jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres.

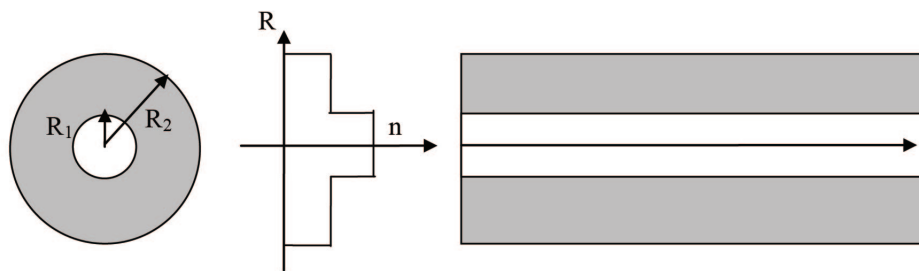


FIGURE 3.3 – Fibre monomode

### 3) Multimode à gradient d'indice

La fibre à gradient d'indice est une fibre dans laquelle l'indice décroît graduellement dans la direction transversale de la fibre, du centre du cœur vers la gaine, jusqu'à atteindre la valeur de l'indice de réfraction  $n_2$  de la gaine. Les fibres à gradient d'indice sont principalement utilisées pour des transmissions à moyenne portée, correspondant à une situation intermédiaire entre les domaines respectifs d'utilisation de la fibre à saut d'indice multimode et de la fibre à saut d'indice monomode.

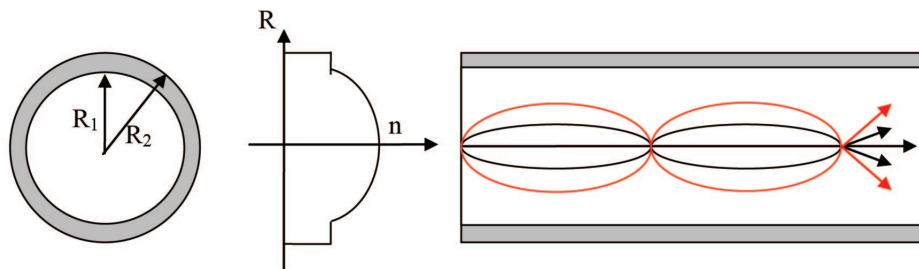


FIGURE 3.4 – Fibre à gradient d'indice

## III) Avantages

**Performances** (atténuation faible, bande passante élevée) permettant des liaisons longues sans répéteurs.

**Immunité électromagnétique** : Immunité électromagnétique : insensibilité aux parasites, aux orages, aux courants telluriques ...

**Isolation galvanique** : Pas de problème de terre dans le raccordement entre deux bâtiments, pas de danger en milieu explosif ...

**Confidentialité** : piratage très difficile.

**Légèreté** : une fibre pèse quelques grammes /km, un câble peut peser de 20 à 100kg/km (selon nombre de fibres et protections) contre plus de 200kg/km pour un coaxial.

Le seul inconvénient des fibres optiques concerne essentiellement la difficulté et le coût des raccordements.

## IV) Domaines d'application de la fibre optique

La fibre optique est utilisée dans de nombreux domaines, parmi lesquels :

### 1) Télécommunications

En télécommunications, la fibre optique est utilisée pour la transmission des informations, que ce soit le type de ces derniers des conversations téléphoniques, des images ou des données. C'est probablement le seul 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 avec une atténuation très faible et grâce aux multiplexages, on atteint la centaine de Gbits/s.

### 2) Médecine

La fibre optique est utilisée en médecine tant pour diagnostiquer des problèmes de santé que pour traiter certaines maladies.

**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 gastroentérologie.

**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.

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.

### 3) Capteurs

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 subie 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.

#### 4) 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.

### EXERCICES

#### Exercice 1

Une fibre optique multimode à saut d'indice a une ouverture numérique de 0,22 (l'ouverture numérique correspond au sinus de l'angle d'ouverture) et un indice de réfraction du cœur de  $n_1 = 1,465$ .

Déterminer la bande passante en bit/s de cette fibre pour une longueur de  $1\text{km}$  ( $BP/km$ ).

#### Exercice 2

Un fibre optique a une bande passante nominale de  $600\text{MHz}/\text{km}$ .  
Quelle est la bande passante d'un segment de câble de  $0,153\text{ km}$  ?

#### Exercice 3

Une mesure est effectuée sur une fibre optique de longueur  $0,367\text{km}$ . Sa limite de fréquence supérieure est déterminée à  $43\text{Mbps}$ .  
Quel est la valeur du facteur de dispersion  $d$  ?

# Chapitre 4

## Faisceaux Hertziens

### I) Généralités

Les systèmes radio sont des supports de transmission qui utilisent la propagation des ondes radio-électriques pour véhiculer les informations entre deux points, sont appelés généralement faisceaux hertzien. Donc un faisceau hertzien est un système de transmission entre deux points fixes par ondes électromagnétique. Leur propagation est limitée à l'horizon. Du fait de l'absence de tout support physique entre les stations, les faisceaux hertziens peuvent surmonter plus facilement des difficultés des parcours et franchir des obstacles naturels tels que : étendues d'eau, terrains montagneux, terrains fortement brisés etc. Par rapport aux systèmes sur câbles à coaxiales qui transmettent directement la bande de fréquence résultant du multiplexage, les FH nécessitent une modulation supplémentaire pour faire porter cette bande de base par les ondes radioélectriques hyperfréquences.

Les liaisons hertzien utilisent la propagation des ondes électromagnétiques dans l'air libre. Elles ont l'avantage de ne nécessite pas de lourds travaux d'infrastructure. Cependant le support utilisé est commun pour tout le monde. Les bandes de fréquence représentent donc une ressource rare et leur utilisation est réglementée par des organismes officiels nationaux et internationaux. Étant donné que les bandes de fréquence utilisées sont imposées, le signal à transmettre sera toujours transposé en fréquence par modulation. Une liaison peut s'établir en visibilité directe entre deux ou plusieurs stations sur des points hauts. Elle a une portée variant de 10 à 60 Km, mais la distance qui est souvent utilisée est de 50 Km.

$$d = 2\sqrt{(H_E + H_R) \cdot R}$$

Avec  $H_E, H_R$  : hauteur des antennes d'émission et réception.  
 $R$  : rayon de la terre

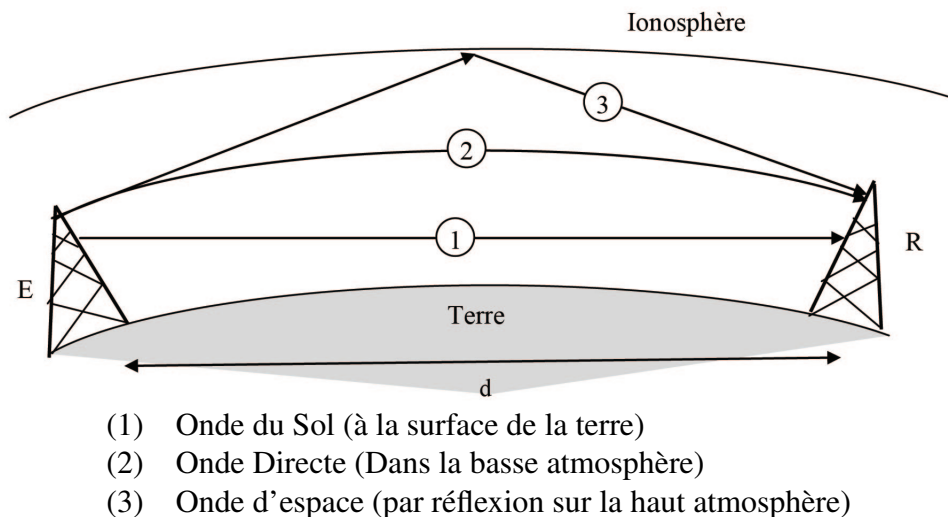


FIGURE 4.1 – Liaisons hertzien

Les principaux modes de propagation en fonction de la fréquence :

- Entre 3 kHz et 3 MHz : la propagation se fait par onde de sol.
- Entre 3 MHz et 30 MHz : la propagation se fait par réflexion sur l'ionosphère mais l'onde de sol et l'onde directe existent aussi. La propagation dépend de beaucoup de facteurs.
- Entre 30 MHz et 3 GHz : la propagation se fait par onde directe mais aussi par réflexion sur le sol (trajets multiples). C'est le cas de la radiodiffusion FM, de la télévision terrestre, du téléphone mobile.
- Entre 3 GHz et 30 GHz : la propagation se fait par onde directe, il y a peu de réflexions sur le sol car les antennes sont très directives (paraboles). C'est le cas des faisceaux hertziens et de la télévision par satellite.

Le bon fonctionnement des liaisons FH est conditionné par les caractéristiques des bonds radioélectriques entre les stations et par celle des antennes utilisées. Ces bonds doivent être en visibilité directe dégagés de tout obstacle et avec des réflexions, des phénomènes de réfraction et de diffraction négligeables.

## II) Principales fréquences et bandes ou canaux

L'attribution des fréquences s'effectue dans le cadre d'organismes internationaux en particulier la Conférence Mondiale des Radiocommunications (CMR) et l'Union Internationale des Télécommunications (UIT). En Algérie cette mission est confiée à l'Agence Nationale des Fréquences (ANF). les principaux bandes communiqué par ANF sont :

- La bande VHF (174- 230MHz) pour diffusion du TV analogique mais cette bande a été mise hors service par L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) 17 juin 2015.
- UHF (470 –862 MHz) pour la diffusion numérique a partir 17 juin 2020 pour la l'Afrique et le Moyen-Orient, ce qui est le cas de l'Algérie.TDA diffuse 7 programmes TV en format SD dans la bande UHF, ainsi que 5 radios nationales
- La bande (108-87MHz) pour toutes les stations radio nationales et régionales

### III) Liaisons satellite

Les liaisons satellites utilisent les mêmes bandes de fréquences que les liaisons hertziennes (essentiellement dans les bandes de 3 à 14 Gigahertz). Typiquement une liaison satellite permet de transmettre de l'ordre de 500 mégabits par seconde. Les satellites de télécommunication sont pour beaucoup des satellites en position géostationnaires à 36 000 km de la terre au dessus de l'équateur. Le temps mis par une onde pour atteindre le satellite est de 0.12 secondes, durée qui n'est pas négligeable et qui peut perturber une communication téléphonique. On voit apparaître des nouveaux réseaux de satellites en orbites basses qui sont utilisés pour permettre les communications avec les mobiles dans les zones peu peuplées ou n'ayant pas d'infrastructure suffisante.

#### 1) Principe

Une station terrestre émet vers le satellite un flux d'information (voie montante). Le satellite n'est qu'un simple répéteur, il régénère les signaux reçus et les ré-émet en direction de la Terre (voie descendante).

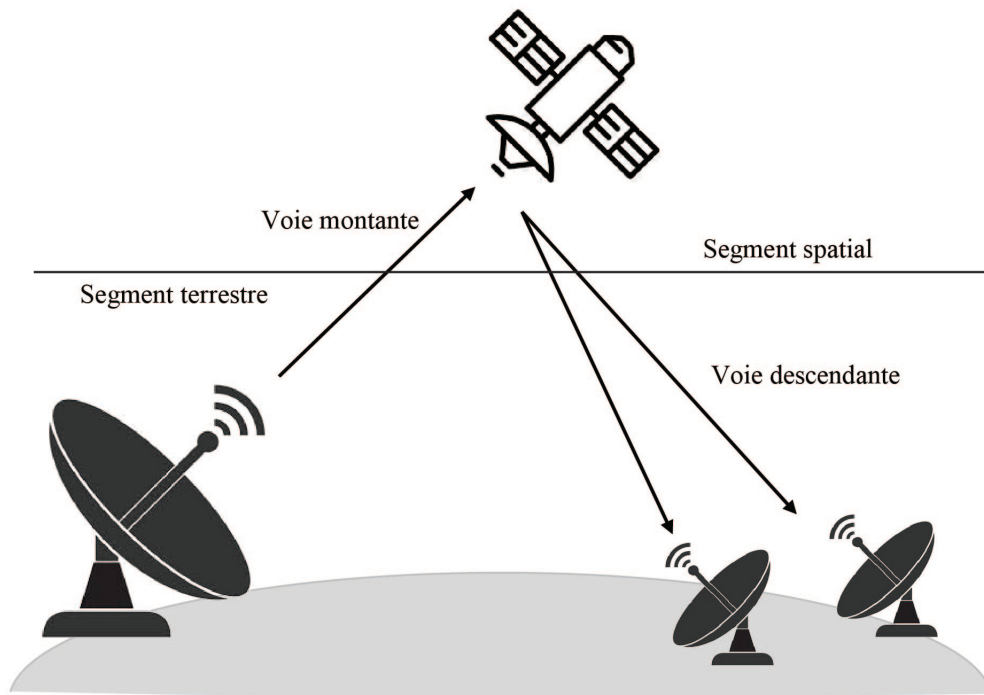


FIGURE 4.2 – Principe d'une liaison satellitaire

La figure 4.2 illustre le principe d'une liaison satellitaire. Pour utiliser un satellite comme point nodal d'un réseau terrestre et, non comme simple relais de télécommunication, il est nécessaire d'admettre plusieurs voies montantes. Celles-ci sont alors en compétition pour l'accès au satellite. Plusieurs techniques peuvent être utilisées :

**L'AMRF** (Accès Multiple à Répartition de Fréquences), consiste à diviser la bande de fréquence du satellite en sous-bandes, chacune réservée à une voie de communication.

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

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

## 2) Les différents types de satellites

Compte tenu des temps de propagation des satellites géostationnaires, on a défini plusieurs familles d'orbite. On distingue 3 types de satellites, selon leur orbite : les orbites stationnaires (GEO), moyennes (MEO) et basses (LEO). Le tableau 4.1 résume les caractéristiques de ces satellites. Les satellites géostationnaires permettent de réaliser :

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

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

les systèmes MEO et LEO qui, pour assurer une couverture spatiale et temporelle totale, impliquent l'utilisation d'une constellation de satellites, c'est-à-dire plusieurs orbites et sur chaque orbite plusieurs satellites.

TABLE 4.1 – Synthèse des caractéristiques des différents systèmes de satellites

	GEO Geostationary Earth Orbit	MEO Medium Earth Orbit	LEO Low Earth Orbit
Altitude	36 000 km	2 000 à 12 000 km	800 à 2 000 km
Type d'orbite	Circulaire	Elliptique ou circulaire	Elliptique ou circulaire
Plan de rotation	Équatorial	Quelconque	Quelconque
Temps de transmission	240 ms	110 à 150 ms	Environ 50 ms
Permanence spatiale et temporelle	OUI	NON	NON
Applications	Téléphonie fixe, télévision, tran. de données	Téléphonie mobile, tran. de données	Téléphonie mobile, tran. de données
Débit	Jusqu'à 155 Mbit/s	De 9,6 à 38 kbit/s	De 2,4 kbit/s à 155 Mbit/s

## **EXERCICES**

### **Exercice 1**

La propagation des ondes électromagnétiques s'effectue selon plusieurs modes qui dépendent de la fréquence (figure 4.2). Les faisceaux hertziens utilisent la propagation par onde directe ou propagation à vue.

Déterminer, en fonction des hauteurs respectives des antennes émission et réception, la portée d'une liaison hertzienne (on supposera la liaison sans obstacle).

### **Exercice 2**

1. Citer caractéristiques des différents systèmes de satellites ?
2. Citer les et les applications de chaque système types de satellites ?

# Chapitre 5

## Faisceaux lumineux (infra-rouge et visible) en espace libre

L'infrarouge a été découvert par l'astronome anglais William Herschel en 1800 à partir de l'échauffement produit par le soleil. A la même année Alexander Graham Bell et Charles Sumner Tainter créèrent le Photophone. Ce dispositif permettait de transmettre sons et conversations par le biais d'un faisceau lumineux. Ainsi, le 3 juin 1880, Bell mena la première transmission téléphonique mondiale sans fil, entre deux immeubles séparés de 213 mètres.

L'invention du laser dans les années 1960 révolutionna l'optique spatiale. Les organisations militaires furent particulièrement intéressées et accélérèrent son développement. Toutefois, la technologie subit une perte de vitesse lors de l'avènement et de l'installation de la fibre optique à des fins civiles.

### I) Spectres

Le rayonnement infrarouge est une onde électromagnétique, au même titre que la lumière visible, les ondes radioélectriques ou rayons X. Il recouvre le domaine de longueurs d'onde qui s'étend au-delà des rayonnements visibles, de  $0,76\mu\text{m}$  à  $1\text{mm}$  comme le montre la figure 5.1.

Le nom d'infrarouge (infra est un mot latin signifiant en dessous) vient du fait que si les longueurs d'onde sont au-dessous de celle du rouge, les fréquences sont, elles, en dessous. Les infrarouges sont souvent classés en trois régions : infrarouge proche, infrarouge moyen et infrarouge lointain.

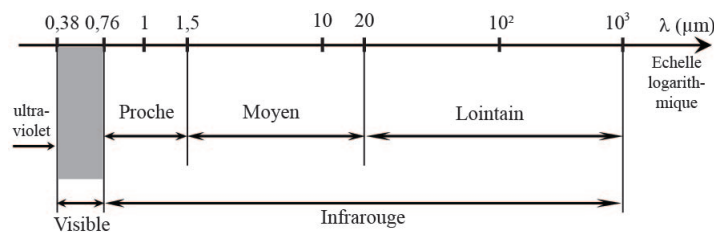


FIGURE 5.1 – Place du spectre des lumières infrarouge et visible

## II) Portées

Dans des applications typiques des faisceaux lumineux, le diamètre du faisceau est de l'ordre du millimètre et de longueur d'onde d'un micron. La distance que le faisceau peut parcourir est de l'ordre des mètres. Dans les applications courantes, le faisceau issu du laser comme parfaitement parallèle. Une application où cette divergence devient impressionnante est la mesure de la distance Terre-Lune. Actuellement, cette mesure est réalisée par télémétrie laser : on envoie des impulsions lumineuses depuis la terre vers la lune, et grâce à des miroirs déposés par différentes missions à la lune, la lumière est renvoyée vers les télescopes terrestres. La mesure du temps mis par la lumière pour réaliser l'aller-retour fournit alors une mesure précise de la distance Terre-Lune. Du fait de la divergence du faisceau, l'intensité de l'onde est considérablement diminuée au retour. Pour la maximiser, ils ont agrandi le faisceau à l'aide d'un miroir de télescope de  $1,5m$ , ce qui donne un rayon du faisceau au niveau de la Lune de  $100m$  seulement. La précision des mesures est exceptionnellement bonne : la distance Terre-Lune est connue aujourd'hui au millimètre près, soit une précision relative de l'ordre de  $10^{11}$ .

## III) Intérêts et limites

### 1) Intérêts

- Déploiement Facile ;
- Transmission longue distance dispensée de licence, contrairement aux transmissions hertziennes qui nécessitent des autorisations ;
- Communication en haut débit possible ;
- Un taux d'erreur très faible ;
- Immunité aux interférences électromagnétiques ;
- Communications full-duplex possible ;
- Confidentialité de transmission élevée, en particulier du fait de la directivité et l'étroitesse du faisceau lumineux.

### 2) Limites

Pour les communications terrestres, les facteurs limitatifs sont dus principalement aux phénomènes naturels tels que :

- Dispersion du faisceau lumineux ;
- Absorption atmosphérique ;
- Pluie, neige et Brouillard qui peuvent provoquer une atténuation entre 10 à 100dB/km ;
- Modification de l'indice de réfraction du milieu terrestre par la chaleur ambiante ;
- Pollution lumineuse parasite ;
- Instabilité des émetteurs et récepteurs en période venteuse ;
- Pollution atmosphérique et rayonnement solaire axial qui gênent la réception.

## IV) Sources infra-rouge

### 1) Diode Infrarouge

#### Principe

une diode infrarouge IRED ( *Infrared emitting diode* ) est une diode semi-conductrice qui produit un rayonnement dans l'infrarouge proche par émission spontanée. le symbole d'une diode infrarouge est donné par la figure 5.2.

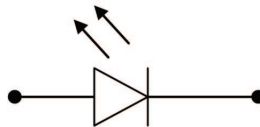


FIGURE 5.2 – Symbole d'une diode infrarouge

En polarisant la diode en sens direct, on amène des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence, c'est l'injection des porteurs. les électrons et les trous peuvent alors se recombiner en émettant un rayonnement. L'énergie libérée lors du passage d'un électron d'un niveau d'énergie  $E_2$  à un niveau inférieur  $E_1$  peut conduire à la création d'un photon avec une énergie  $h\nu$  ( $h$  : constante de Planck,  $\nu$  la fréquence de radiation) :

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Le choix du matériau semi-conducteur permet d'obtenir un rayonnement soit dans l'intervalle visible ou dans l'infrarouge proche, pour obtenir un rayonnement infrarouge on utilise soit  $GaAs$ , soit un composés  $Ga_xAl_{1-x}$  ou  $x$  est la proportion du gallium.

#### Caractéristique

**Intensité lumineuse :** Le flux ou l'intensité du rayonnement émis est commandé par le courant qui traverse la diode. La courbe de l'intensité  $I_e$  en fonction du courant dans la diode  $i_D$  est relativement linéaire, l'intensité est souvent rapportée à  $I_{e0}$  qui correspond à un courant fixe  $i_{D0}$  comme il est illustré à la figure 5.3

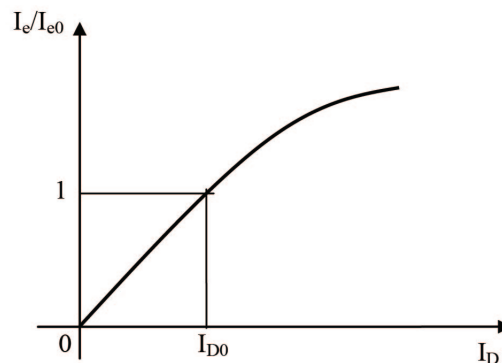


FIGURE 5.3 – Courbe de l'intensité énergétique en fonction du courant

**Spectre d'émission :** Le rayonnement émis par une diode infrarouge n'est pas monochromatique, mais possède un spectre continu en forme de cloche comme le montre la figure 5.4. Les intensités énergétiques sont données en valeurs relatives. L'abscisse  $\lambda_p$  du maximum est appelée longueur d'onde de pic. L'étendue spectrale est chiffrée par la largeur  $\Delta\lambda$  à mi-intensité.

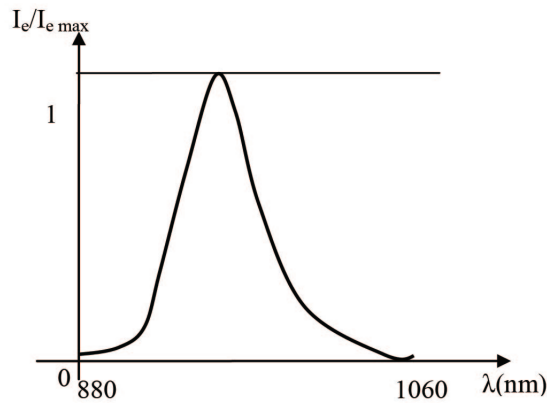


FIGURE 5.4 – Spectre d'émission d'une diode infrarouge

## V) Sources de lumière visible

### 1) Diodes électroluminescentes (LED)

La LED ou DEL (light emitting diode) est le composant émetteur le plus simple réalisé directement l'émission de photons par recombinaison des porteurs dans une hétérojonction polarisée en direct. Les matériaux utilisés sont choisis en fonction de la longueur d'onde d'émission.

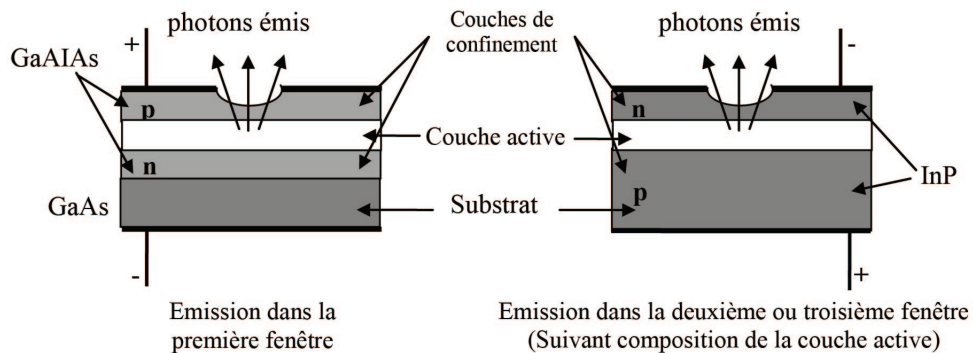


FIGURE 5.5 – Diodes électroluminescentes

## Caractéristiques Principales Des Diodes Electroluminescentes

- Un spectre typique de l'émission spontanée, continu et assez large (d'où une forte sensibilité à la dispersion chromatique) ;
- Une caractéristique puissance-courant assez linéaire, avec une pente de l'ordre de  $10mW/A$ , valeur limitée par l'échauffement de la diode ;
- une caractéristique courant tension typique d'une diode, avec une tension de coude de l'ordre de  $1.5V$  (dépend du matériau).il faut donc alimenter une LED en courant et non en tension ;

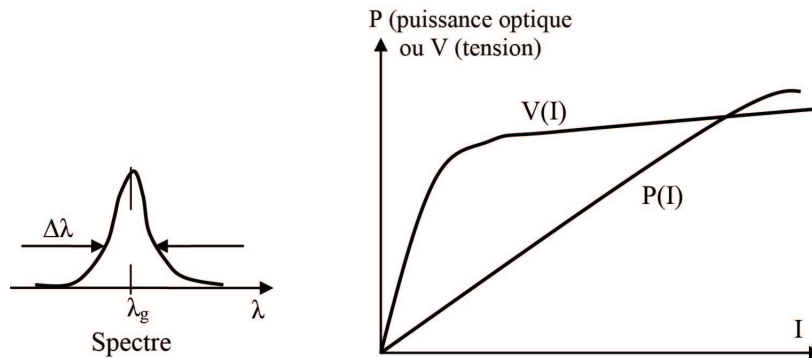


FIGURE 5.6 – Caractéristiques d'une diode électroluminescente

- Un diagramme d'émission en loi de Lambert, c'est-à-dire que la puissance rayonnée dans une direction  $\theta$  vaut :  $P(\theta) = P_0 \cdot \cos(\theta)$  ( $P_0$  puissance rayonnée dans l'axe). Intéressant pour les liaisons infrarouges directes et elle n'est pas très adapté au couplage dans une fibre optique
- Un temps de réponse assez élevé (de l'ordre de dizaine  $ns$ ) ce qui limite la bande passante autour de  $100MHz$ .

ce composant de performances limitées mais très utile grâce à son faible cout, son bruit très bas et son excellente fiabilité.

## 2) Diode Laser

La structure des diodes laser est plus complexe. Ce sont des composants à émission par la tranche, ou la lumière est confinée dans la couche active. De plus, les diodes laser doivent remplir les deux fonctions d'un oscillateur optique qui est un laser : l'amplification et la résonance. L'amplification de la lumière est obtenue par émission stimulée. L'inversion de population est obtenue par injection d'une densité de courant très élevée à travers la jonction (de l'ordre de  $kA/cm^2$ ). L'amplification se produit donc lorsque le courant dépasse une valeur seuil  $I_{th}$  qui va de  $mA$  à plusieurs dizaines de  $mA$  en fonction de la structure du composant ; les porteur normalement minoritaires après la traversée de la jonction deviennent alors une majorité correspondant à l'inversion de population.

La lumière amplifiée provient d'une émission laser spontanée du laser, non nulle lorsqu'on est en dessous du seuil, ce peut être une lumière incidente externe.

En régime d'émission stimulée, la puissance lumineuse augmente pendant sa propagation le long de  $Oz$  suivant la loi :  $P(z) = P_0 e^{gz}$  avec  $g$ =coefficient de gain( $m^{-1}$ ).

Ce coefficient dépend de la longueur d'onde et n'est positif qu'à l'intérieur d'une bande de

gain plus étroite que la bande d'émission spontanée, ou la fréquence ' $\nu$ ' des photons amplifiés obéissent à la relation de Bernard-Durraffoug :

$$E_g \prec h\nu \prec F_2 - F_1$$

où  $F_2$  et  $F_1$  sont les pseudo-niveaux de Fermi des électrons et des trous. Pour que l'inégalité soit possible, ils devront se trouver respectivement dans la bande de conduction et dans la bande de valence, ce qui correspond à l'inversion de population.

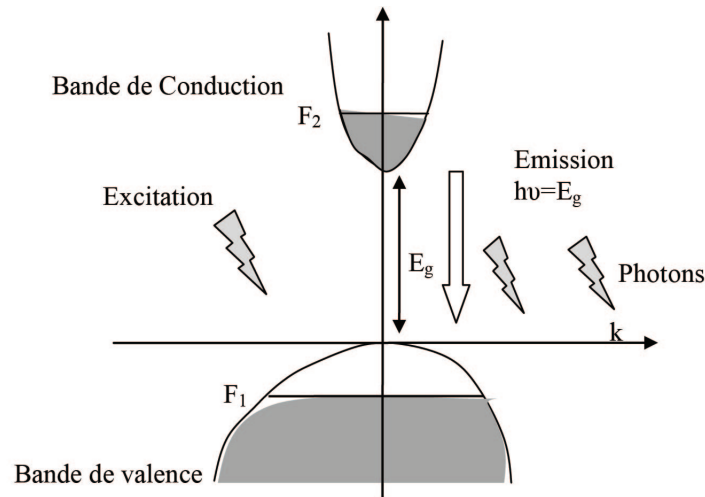


FIGURE 5.7 – Diagramme des bandes d'énergie en émission stimulée

Le gain augmente également avec la densité de courant  $J$  suivant la loi :

$$g = \beta \eta_i (J/d - J_0)$$

avec :  $\beta$  : gain du matériau ( $5.10^{-2} \text{cm.m/A}$  pour GaAs) ;

$\eta_i$  : rendement quantique de l'émission spontanée ;

$d$  : épaisseur de la zone active ;

$J_0$  : densité de seuil ( $4.5.10^3 \text{ A/cm}^2$  pour GaAs)

il est donc nécessaire, pour fonctionner sous faible courant de seuil, d'avoir une zone de recombinaison très peu épaisse ( $< 0.1$ ) et étroite (quelque  $\mu\text{m}$ ) ce qui est possible grâce aux structures à double hétérojonction.

De plus, il faut compenser les pertes dans le guide (en  $e^-$ ) et l'émission de lumière par les faces

donc :  $e^{2gL} \cdot e^{-2\alpha L} R^2 \geq 1$

soit :  $g \geq \alpha - \frac{\ln(R)}{L}$  avec :  $R$  coefficient de réflexion aux faces ; comme  $R < 1$ ,  $\ln(R) < 0$  et  $g$  doit être sensiblement supérieur à  $\alpha$ .

La lumière amplifiée n'est pas monochromatique : un dispositif optique sélectif est nécessaire pour obtenir une raie unique. La résonance est obtenue par la structure de la cavité, qui permet de sélectionner la ou les fréquences amplifiées.

## VI) Applications

Les infrarouges sont utilisés dans de nombreux domaines, nous allons citer quelque application en électronique.

## **1) Pyrométrie optique**

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température à partir du rayonnement émis. L'intérêt est qu'aucun contact avec l'objet n'est nécessaire. On peut ainsi effectuer des mesure à distance, dans des environnement dangereux, sur des objets en mouvement, ou des températures très élevées, et tous choses qui sont impossibles avec les capteurs thermométrique classiques.

## **2) Thermographie**

La thermographie infrarouge permet la mesure des températures de surface et de leurs variations spatiales et temporelles, et la transformation des résultats en image visible, dont on peut suivre leurs évolutions. Parmi ces applications on peut citer l'observation des fuites de chaleur dans les bâtiment, le contrôle des installations électriques ainsi que l'étude du comportement thermique des circuits d'électronique de puissance.

## **3) Spectroscopie**

La spectroscopie permet de déterminer la composition chimique d'un corps par l'étude du rayonnement émis ou absorbé. C'est une technique particulièrement utile pour des distances très importantes.

## **4) Photographie infrarouge**

La photographie infrarouge est en général la transposition visible de la réflexion du rayonnement infrarouge sur un objet éclairé par une source naturelle ou artificielle. Elle est utilisée généralement pour l'étude des anciens tableaux.

## **5) Chauffage, Séchage et Cuisson**

Parmi les applications des infrarouge, on trouve :

- Le séchage industriel ( par exemple les peintures et les papiers)
- Le chauffage des grandes espaces.
- Le chauffage ponctuel et instantané.
- La cuisson industrielle ou domestique.

## **6) Transmission en espace libre**

L'infrarouge est utilisé depuis longtemps dans les télécommandes de téléviseurs ou les chaînes haute-fidélité. Plus récemment, l'infrarouge a trouvé un certain nombre d'applications dans le domaine des liaisons informatique.

## **7) Télécommunications**

Aujourd'hui, la plupart des communications téléphoniques à longue distance passent par des fibres optiques et le support de l'information est un rayonnement infrarouge émis par une

diode laser. Cela est dû aux progrès considérables faits dans la technologie des fibre optiques, ce qui permet à ce support de supplanter les câbles coaxiaux et les liaisons par satellite.

## Questions

1. Le spectre optique se compose de trois parties. Nommez-les.
2. Quel segment du spectre optique a les fréquences les plus élevées ? Les fréquences les plus basses ?
3. Indiquer la longueur d'onde la plus basse et la longueur d'onde la plus élevée de la lumière visible, et indiquer la couleur de chacune.
4. Quelle est la gamme de longueurs d'onde de la lumière infrarouge ?
5. Tracer un schéma fonctionnel simple d'un système de communication optique et expliquer le but et le fonctionnement de chaque élément.
6. De quel matériau semi-conducteur les LED sont-elles habituellement faites ?
7. Quelle structure crée lorsque des surfaces réfléchissantes sont ajoutées à une diode laser ? Comment affecte-t-elle les ondes lumineuses générées et émises ?

# Bibliographie

- [1] L. E. Frenzel Jr., "Principle of Electronic Communication Systems," 2014.
- [2] Claude Servin, "RÉSEAUX ET TÉLÉCOMS, Cours et exercices corrigés," Dunod, Paris, 2003.
- [3] P. Combes , "Mico-ondes, circuits passifs, propagation, antennes, Cours et exercices", Dunod,1997.
- [4] J. Quinet, "Théorie et pratique électronique et amplificateur, lignes electriq, eq de max-well". Tome 3. DUNOD, 1963.
- [5] P. Lecoy, "Fiber-Optic Communications". John Wiley Sons, Inc., 2007.
- [6] L. REYNIER, "Radiocommunications ( Liaisons hertziennes, antennes, équipements)". ellipses, 2014.
- [7] G. Barué, "MICROWAVE ENGINEERING", John Wiley. 2008.
- [8] J. D. D. G. Smith, "Telecommunications Engineering." Chapman Hall, 1989.
- [9] D. S. Danièle Dromard, "Architecture des réseaux". Pearson Education, 2010.
- [10] P. Mayé, "Les infrarouges en électronique". ETSF, Dunod, 2003.

**Semestre: 5**

**Unité d'enseignement: UED 3.1**

**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 (infra-rouge et visible) en espace libre (2 Semaines)**

Spectres. Portées. Intérêts et limites. Sources infra-rouge. 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".